

Technická univerzita v Liberci

Fakulta strojní

Katedra obrábění a montáže

Bakalářský studijní program: Strojírenství

Zaměření: Řízení výroby

**VLIV DRUHU POPÍLKU V GEOPOLYMERNÍCH
KOMPOZITNÍCH SYSTÉMECH NA TRVANLIVOST
NÁSTROJE A KVALITU POVRCHU PŘI VRTÁNÍ**

**TOOL DURABILITY AND SURFACE QUALITY OF DRILLING
PROCESS IN RELATION OF FLY-ASH TYPE IN
GEOPOLYMER COMPOSITE SYSTEMS**

KOM - 1196

Roman Vrkoslav

Vedoucí práce: prof. Ing. Alexey Popov, DrSc.

Počet stran: 67

Počet příloh: 4

Počet obrázků: 42

Počet tabulek: 13

Počet grafů: 12

20.5.2012

**VLIV DRUHU POPÍLKU V GEOPOLYMERNÍCH KOMPOZITNÍCH
SYSTÉMECH NA TRVANLIVOST NÁSTROJE A KVALITU POVRCHU
PŘI VRTÁNÍ**

ANOTACE:

Práce se zabývá zkoumáním vlivu druhu a obsahu úletového popílku v geopolymerních kompozitních systémech na trvanlivost nástroje a kvalitu povrchu při vrtání.

Cílem této bakalářské práce bylo zjistit vliv druhu a obsahu úletového popílku v geopolymerních kompozitních systémech na trvanlivost nástroje, řezné síly a parametry drsnosti povrchu při vrtání.

**TOOL DURABILITY AND SURFACE QUALITY OF DRILLING
PROCESS IN RELATION OF FLY-ASH TYPE IN GEOPOLYMER
COMPOSITE SYSTEMS**

ANNOTATION:

This paper deals with research into the influence of a type and content of fly ash in geopolymer composite systems on tool durability and surface quality of a drilling proces.

The objectives of this bachelor's thesis was to find out how the type and content of fly ash in geopolymer composite systems result on tool durability, cutting strength and surface roughness parameters in drilling.

Klíčová slova: GEOPOLYMERY, VRTÁNÍ, TRVANLIVOST, DRSNOST

Key words: GEOPOLYMERS, DRILLING, DURABILITY, ROUGHNESS

Zpracovatel: TU v Liberci, KOM

Dokončeno: květen 2012

Archivní označ. zprávy:

Počet stran: 67

Počet příloh: 4

Počet obrázků: 42

Počet tabulek: 13

Počet grafů: 12

PROHLÁŠENÍ

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce.

20.5.2012

Roman Vrkoslav

Poděkování

Tímto bych chtěl velice poděkovat mému vedoucímu bakalářské práce prof. Ing. Alexeyi Popovovi, DrSc., za poskytnutí cenných rad, vstřícné jednání a trpělivost při vedení mé práce.

Dále děkuji panu Ing. Jiřímu Karáskovi za pomoc s měřicími přístroji a panu Martinu Kordíkovi za pomoc a zaškolení s prací na stroji.

V neposlední řadě bych také rád poděkoval celé své rodině za jejich podporu a trpělivost při mém studiu.



Obsah

1 Teoretická část.....	8
1.1 Geopolymery.....	8
1.1.1 Chemická podstata a struktura geopolymery.....	9
1.1.2 Suroviny a výroba geopolymery.....	10
1.1.3 Vlastnosti a využití geopolymery.....	12
1.1.4 Obrábění geopolymery.....	13
1.2 Trvanlivost nástroje při třískovém obrábění.....	14
1.2.1 Opatření břitů řezného nástroje.....	16
1.2.1.1 Průběh opotřebení břitů řezného nástroje.....	17
1.2.2 Optimalizace řezných podmínek při obrábění.....	18
1.2.3 Analýza existujících metod zkoumání trvanlivosti.....	19
1.2.3.1 Dlouhodobé zkoušky trvanlivosti.....	19
1.2.3.2 Krátkodobé zkoušky trvanlivosti.....	21
1.3 Technologie vrtání.....	24
1.3.1 Charakteristika vrtání.....	25
1.3.2 Kinematika a parametry procesu vrtání.....	28
1.3.2.1 Definice veličin při vrtání.....	28
1.3.3 Měření sil a momentů při vrtání.....	32
2 Experimentální část.....	33
2.1 Popis strojů a měřících přístrojů.....	33
2.1.1 Otočná vrtačka VR4 [21].....	33
2.1.2 Nástrojová univerzální bruska N1 [21].....	34
2.1.3 Dynamometr s tenzometrickými snímači.....	35
2.1.4 Nástrojová lupa Brinell.....	38
2.1.5 Mikroskop Arsenal SZP 3112 – T.....	38
2.1.6 Laboratorní profiloměr MITUTOYO SV – 2000 N2.....	39
2.2 Příprava zkušebních vzorků.....	39
2.3 Metodika provedení experimentu.....	40
2.3.1 Postup při realizaci experimentu.....	42
2.3.2 Způsob měření a provedení experimentu.....	42
2.4 Analýza naměřených hodnot.....	43
2.4.1 Vliv druhu úletového popílku v GP na trvanlivost nástroje při vrtání.....	43
2.4.2 Vliv obsahu úletového popílku v GP na trvanlivost nástroje při vrtání.....	47
2.4.3 Vliv druhu úletového popílku v GP na velikost řezných sil a krouticího momentu při vrtání.....	51
2.4.4 Vliv obsahu úletového popílku v GP na velikost řezných sil a krouticího momentu při vrtání.....	55
2.4.5 Vliv druhu úletového popílku v GP na drsnost povrchu v dírách po vrtání.....	58
2.4.6 Vliv obsahu úletového popílku v GP na drsnost povrchu v dírách po vrtání.....	60
3 Shrnutí výsledků.....	62
3.1 Hodnocení trvanlivosti nástroje.....	62
3.2 Hodnocení sil a krouticích momentů.....	62
3.3 Hodnocení parametrů drsnosti povrchu.....	64
4 Závěr.....	66



Seznam použitých zkratk a symbolů

ČSN	- československá norma
DIN	- Deutsche Industrie Norm – německá průmyslová norma
GP	- Geopolymer(y)
HSS	- High Speed Steel – rychlořezná ocel
NO	- Nástrojová ocel
RO	- Rychlořezná ocel
SNOP	-Soustava stroj – nástroj – obrobek - přípravek



Úvod

V dnešní době je ve všech průmyslových odvětvích kladen stále větší důraz na ochranu životního prostředí a efektivitu ekonomické výroby, při zachování mechanických, fyzikálních a chemických vlastností a kvality výrobku. To vede k hledání nových materiálů a metod výroby, které tyto zvyšující se požadavky trhu a moderní společnosti splňují. Jedním z nástrojů, které vedou k ekonomické a zároveň ekologické výrobě, je znovu využívání již použitých materiálů. Jednou z možných variant recyklace je tzv. geopolymery. Geopolymery jsou anorganické uměle vyrobené materiály, které mají podobné vlastnosti jako přírodní materiály. Díky jejich specifickým vlastnostem, ale také finanční a energetické nenáročnosti, je jejich výroba a uplatnění rozšiřována do různých průmyslových oblastí [2].

Tato práce se zabývá vrtáním geopolymerních kompozitních systémů, které jsou plněny elektrérenským popílkem z různých elektréren. Tyto geopolymery se dají například využívat ve stavebnictví jako náhrada betonu. Nejen, že mají vyšší pevnost v tlaku, jsou odolné vůči ohni a mrazu, ale také při jejich výrobě vzniká šestkrát méně oxidu uhličitého, než při výrobě cementu [1].

Cílem bakalářské práce je zjistit vliv druhu a procentuálního obsahu elektrérenského popílku v geopolymery, na jeho schopnost být obráběn. Z pohledu obráběného geopolymery se jedná o parametry drsnosti povrchu a kvalitu okrajů otvorů po vrtání. A z hlediska nástroje se zabývá řeznou silou, posuvovou silou, krouticím momentem a trvanlivostí nástroje.



1 Teoretická část

1.1 Geopolymery

Francouzský profesor chemie Joseph Davidovits přišel v 70. letech minulého století s objevem, že každý kámen se dá vytvořit uměle. Novou hmotu nazval geopolymery. Název geopolymery v první řadě popisuje způsob přípravy materiálu (GEOsyntézou) a dále pak využívá analogického přirovnání výsledného produktu k běžně používanému materiálu, jakým jsou plasty (POLYMER). Pod pojmem geopolymery se skrývají anorganické, uměle vyrobené (polymerní) materiály, které jsou připravovány reakcí základních hlinito-křemičitanových minerálů v zásaditém prostředí za normální teploty a tlaku. Tato reakce byla označena jako geopolymery. Její pomocí lze využít řadu odpadních surovin (především elektrárenské a teplárenské popílků) a přeměnit je na plnohodnotné geopolymerní materiály. Geopolymery jsou na první pohled nerozeznatelné od kamene, ale svými vlastnostmi je jednoznačně předčí. Nabízejí totiž úžasné možnosti modifikací a dosažení jedinečných kombinací vlastností, díky kterým materiál překrývá tisíciletí. Patří k nim především vysoká pevnost v tlaku a odolnost vůči kyselým deštům, ohni i bakteriím [2].

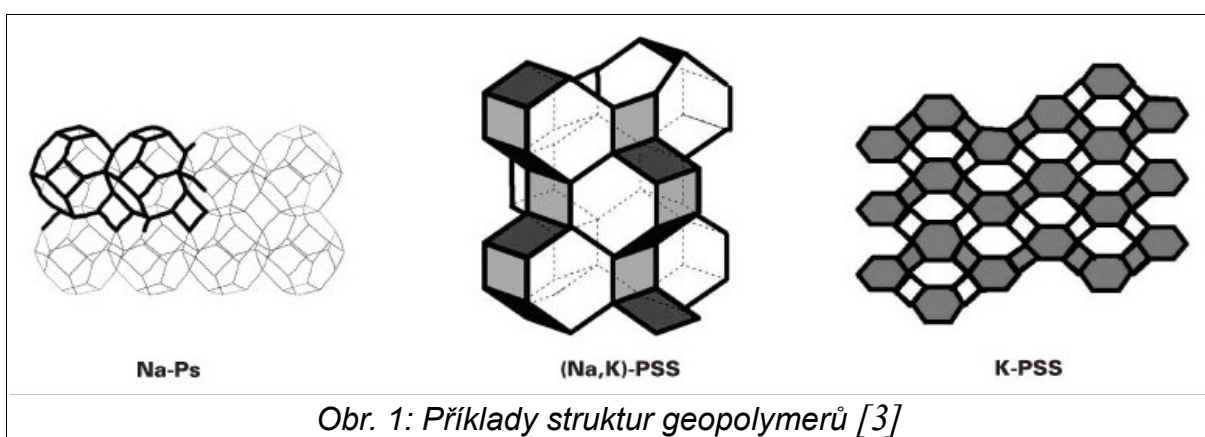
Prakticky jakýkoli kámen lze vytvořit uměle, a to s takovou dokonalostí napodobení, že se od přírodního dá rozlišit jen vysoce specializovanou analýzou. Špičkový francouzský chemik Joseph Davidovits dospěl k názoru, že před pěti tisíci lety, při stavbě pyramid nemohli dělníci bez důmyslných transportních mechanismů dostávat obrovské kvádry do takových výšek. Proto ke stavbě pyramid využívali stavebníci období záplav, kdy se Nil rozlil do daleka. Tehdy snášeli mokré písek z nejbližšího okolí, na místě ho pečovali do forem, smísili s aktivními prostředky a pak nechali slunce, aby směs postupně vysušila a proměnila v litý kámen.

Tuto teorii dnes podporují nejen dochovaná vyobrazení a hieroglyfický zápis na čtyřech staroegyptských tabulkách, ale i řada důkazů z později provedených laboratorních zkoušek. Nerost, z něhož jsou pyramidy postaveny, obsahuje vodu, pohlcuje záření, ve spodní části je hustší než v horní a jsou v něm nepatrné vzduchové bubliny. Nic z toho se u přírodních kamenů nevyskytuje. Navíc jsou některé složky vzorků z pyramid amorfní a uvnitř vzorku lze najít rovněž vlasy. Vše

tedy nasvědčuje tomu, že stavitelé ve starém Egyptě používali vyspělou technologii, která využívala dostupných přírodních zdrojů (vápenec, voda, jíl, soli) k výrobě „geopolymerického betonu“ [1].

1.1.1 Chemická podstata a struktura geopolymerů

Při působení silně alkalického prostředí (hydroxidy, křemičitany) na aluminosilikátové látky typu cementářského slínku, strusky, popílků či tepelně aktivovaných kaolinitických látek vznikají nové materiály - geopolymery, jejichž základem je 2-3D struktura Si-O-Al [5].



Alkalická aktivace silikátových a aluminosilikátových materiálů probíhá ve vodném prostředí při $\text{PH} > 12$ „přes roztok“. Tento proces je odlišný od hydratace anorganických pojiv. Alkalicky aktivované materiály jsou na rozhraní mezi klasickými hydratovanými pojivy, skelnými a keramickými materiály [2].

Alkalická aktivace aluminosilikátů probíhá ve třech krocích. Každý z nich může postupovat různými způsoby, které vedou k rozdílným výsledným produktům. Formování geopolymeru je velmi rychlé a všechny kroky probíhají v podstatě současně. Aluminosilikátové sklo je rozpuštěno v kontaktu se silným alkalickým roztokem. Volné ionty se přeorientovávají a vytvářejí shluky (malé molekuly). Poté, co nukleidy dosáhnou kritické velikosti, začíná růst krystalů. Tyto malé molekuly přítomné v roztoku se mohou spojit a vytvořit velké molekuly, které se srazí ve formě amorfního gelu s minoritními krystalickými fázemi. Složení a struktura tohoto alkalického aluminosilikátového gelu závisí na velikosti, struktuře a koncentraci



iontových druhů přítomných v médiu, tak i na teplotě, délce ošetřování a na pH směsi. Prostorová struktura aluminosilikátového (geopolymerního) gelu se skládá z tetraedrů AlO_4 a SiO_4 spojených sdílenými atomy kyslíku [2, 6].

Vzniklý dvojrozměrný až trojrozměrný geopolymery má obecný vzorec $M_k [(\text{Si} - \text{O})_z - \text{Al} - \text{O}]_k \cdot w\text{H}_2\text{O}$

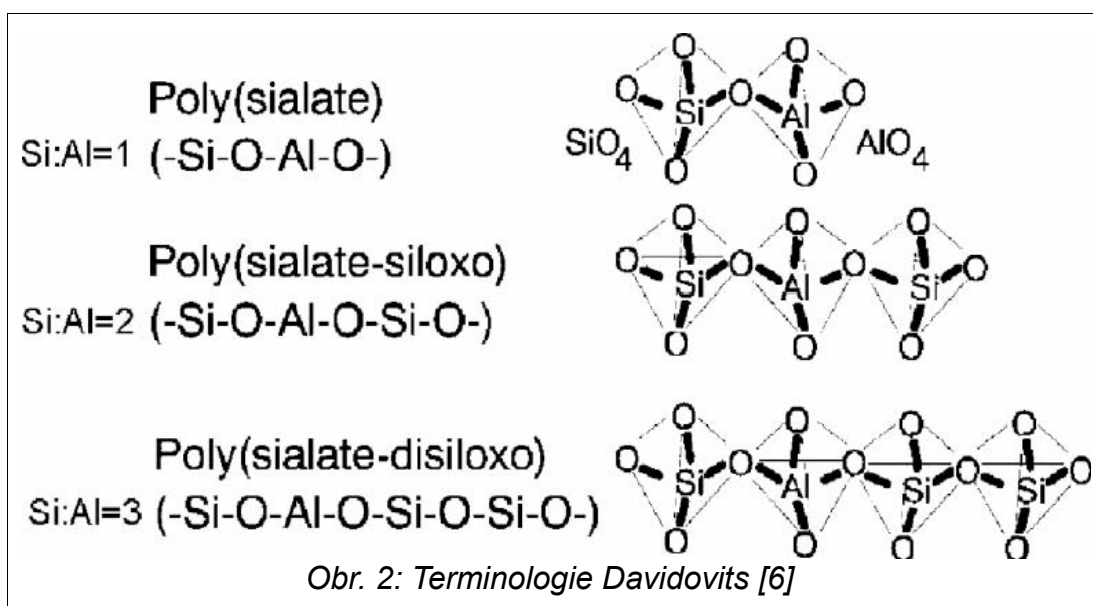
kde: M je alkalická složka (K, Na, Ca, ...),

z ... počet tetraedrických jednotek (1, 2 nebo 3),

k ... stupeň polykondenzace,

w ... počet molekul vody [5].

Pro lepší popis vzniku nových prostorových, řetězcových a kruhových molekul vznikajících polykondenzací různých hlinitých a křemičitých primárních látek, navrhl Davidovits symboliku a terminologii založenou na stavebních blocích křemíku (Si) a hliníku (Al).



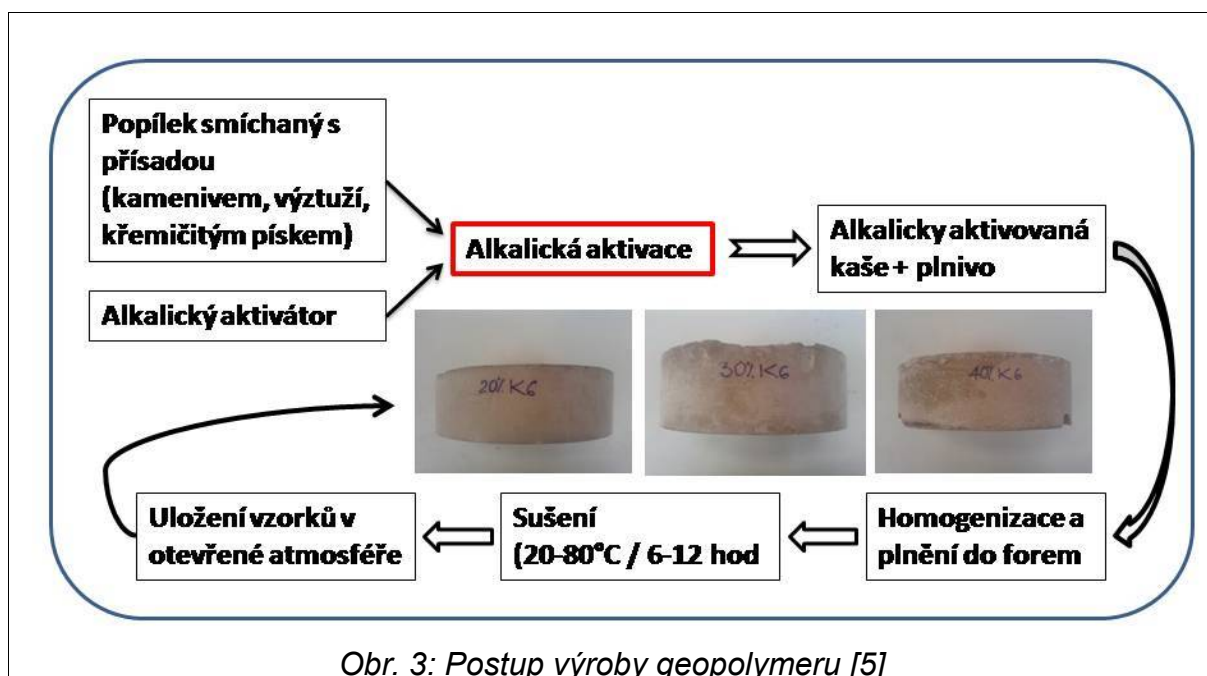
1.1.2 Suroviny a výroba geopolymérů

Pro přípravu geopolymérů lze použít jakýkoli anorganický materiál, který se skládá ze silikátů nebo aluminosilikátů. Základní surovinou může být přírodní materiál (např. albit, kaolinit, jíly) nebo lze použít řadu odpadních surovin (např. elektrárenské a teplárenské popílků, vysokopecní strusku) a přeměnit je na

plnohodnotné geopolymerní materiály [2].

Geopolymery se vyrábějí alkalickou aktivací vhodného materiálu, jako například elektrárenský popílek, různé strusky a nebo z materiálů již využívaných v betonářském průmyslu, což jsou například metakaolin a Portlantský cement. Využívají se a zkoumají jejich různě připravované směsi spolu s plnivem (kamenivem a výztuží), ve snaze nalézt kombinaci s co nejlepšími vlastnostmi [1].

Pevnost a vlastnosti vzniklého geopolymery jsou ovlivněny mnoha faktory, jako je druh nebo směs alkalického aktivátoru např. roztoky sodíku (NaOH), draslíku (KOH) nebo vodní sklo (Na křemičitan), druh plniva (chemické složení, obsah (CaO), velikost částic), vodní součinitel i doba a způsob ošetřování [2, 7].



Výroba geopolymery alkalickou aktivací geopolymerního pojiva z úletového popílku je na obr. 2 a probíhá přidáním alkalických aktivátorů (NaOH + vodní sklo) do směsi kameniva a popílku v daném poměru. Tato směs se homogenizuje a plní do forem, ve kterých se suší [5].

1.1.3 Vlastnosti a využití geopolymery

Geopolymery nabízejí široké a různorodé uplatnění díky možnosti modifikace a tím dosažení různých kombinací jejich vlastností. Jako je vysoká pevnost v tlaku



(50-160 MPa), odolnost vůči žáru (až 1200°C), mrazu (300-1300 zmrazovacích cyklů), kyselinám, bakteriím, nízká hustota, malá teplotní vodivost, vysoká chemická odolnost, malé dotvarování a hydratační smrštění [2, 7].

Navíc lze označit geopolymery za ekologický materiál, protože při jejich výrobě vzniká více než o 50% oxidu uhličitého (CO_2) méně, než při přípravě Portlandského cementu. Celosvětová spotřeba betonu je odhadována na 8,8 miliardy tun ročně. Cementářský průmysl je zodpovědný za produkci 60% emisí (CO_2) z průmyslové výroby.

Další nespornou ekologickou výhodou je využití odpadního materiálu (např. vysokopeční strusky, elektrárenského popílku, odpadní vody s obsahem alkálií) při výrobě geopolymerní matrice [7].



Obr. 4: Ukládání popílku do povrchového dolu v Havířově [8]

Řešení problému s odstraněním odpadních produktů z tepelárenských a energetických výroben stojí v době růstu výroby elektrické energie v popředí zájmu. V tepelných elektrárnách a teplárnách spalujících tuhá paliva odpadá z kotelních zařízení značné množství tuhých odpadů. Velká část těchto odpadních produktů je stále ještě skládkována nebo ukládána do povrchových lomů a dolů nebo do hlubinných dolů. Ale to už se může zanedlouho zlepšit díky většímu využívání geopolymerní matrice.

Studie v oblasti stabilizace/solidifikace odpadů obsahujících těžké kovy nebo nebezpečný radioaktivní odpad prokazují velice dobré výsledky geopolymerní matrice. Vzhledem ke svým vlastnostem jsou výhodnější oproti klasickým cementovým

(cementace) nebo skelným (vitifikace) matricím. Technologie stabilizace/solidifikace pomocí geopolymerních matric byla úspěšně poloprovozně odzkoušena na odpadech z těžby uranu v Německu, v oblasti Vizmutu [3].

Geopolymery nabízejí rozsáhlé a různorodé uplatnění ve stavebnictví, automobilovém průmyslu, letectví, kosmonautice atd. - viz obr. 5. Geopolymery mohou díky své extrémní odolnosti sloužit jako vynikající izolace a stavební materiál. První aplikace ve stavebnictví pocházejí z let 1972 – 1976, kdy byl geopolymery nanášen na dřevotřískové desky, aby zvýšil jejich ohnivzdornost. Byl také použit na opravu letištní plochy v Los Angeles. Geopolymer odolává vysokým teplotám, a proto se také používá na výrobu výfukového potrubí vozů Formule 1 (v roce 2004 patentovala firma Porsche výfukové potrubí s geopolymerním nosičem katalyzátoru), nebo na výrobu tepelných štítů pro raketoplány [1].



Obr. 5: Příklady použití geopolymery [1]

1.1.4 Obrábění geopolymery

Na katedře obrábění a montáže (KOM) TU v Liberci bylo již realizováno vrtání i frézování GP. Tato obrábění byla provedena bez použití procesních kapalin. A tyto vzorky GP se lišili použitým plnivem. Byl to úletový popílek, lupek a kámen v koncentraci 40% a dále bylo provedeno orientační vrtání GP s různým obsahem (20%, 30% a 40%) popílku K6. Při všech těchto obráběních vždy vznikaly elementární třísky ve formě jemného prášku.

Ze závěrů těchto prací vyplývá, že nejvyšší řezné síly a největší opotřebení nástroje bylo naměřeno při obrábění GP s plnivem lupek 40% a nejnižší řezné síly a nejmenší opotřebení nástroje při obrábění GP s plnivem popílek 40% [23].

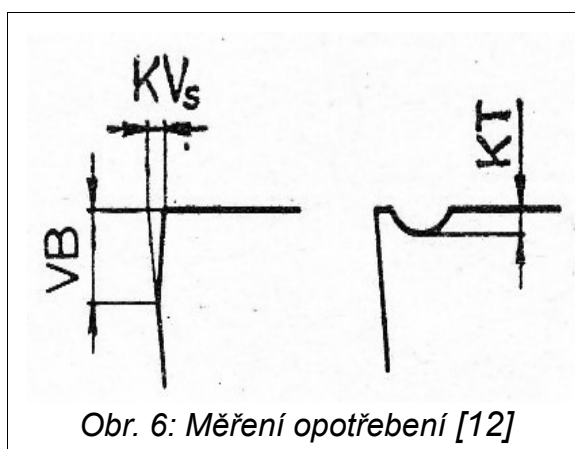


1.2 Trvanlivost nástroje při třískovém obrábění

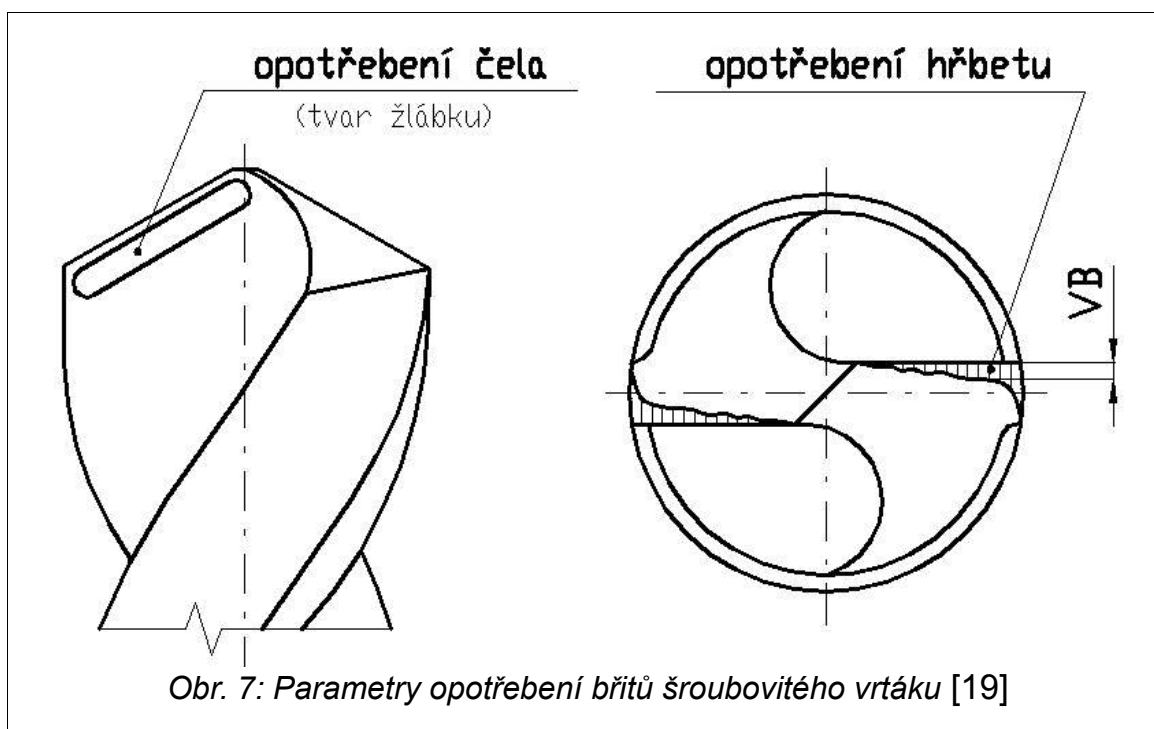
Čas, po který nástroj pracuje od svého naostření až do otupení, se nazývá trvanlivost nástroje. Trvanlivost bříty je základním parametrem ve vztahu k hospodárnosti řezného procesu. Abychom mohli určit pro jednotlivé případy obrábění hodnotu trvanlivosti, je potřeba definovat stav bříty, kdy jej považujeme za otupený.

Stav otupení bříty nástroje lze hodnotit buď z hlediska technologického, nebo ekonomického.

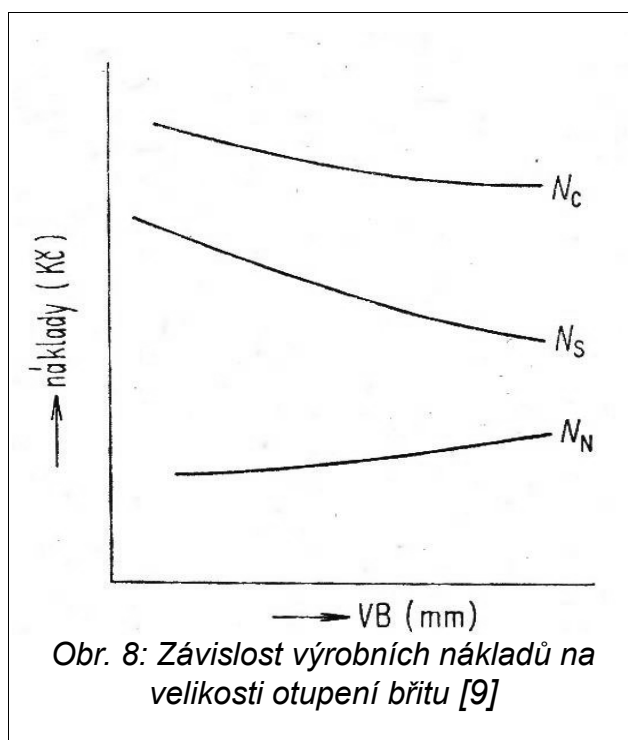
Z technologického hlediska považujeme břit nástroje za otupený, když není schopen obrábět danou plochu v požadované jakosti. Toto hledisko se uplatňuje zejména při dokončovacích operacích, jako je například vyvrtávání, protahování, jemné soustružení a podobně. Jako základní parametry hodnocení velikosti opotřebení bříty slouží VB – opotřebení hřbetu, KT – opotřebení čela a KV_s, který charakterizuje změnu rozměru obrobku a má význam při obrábění na čisto a jemném obrábění.



Použití těchto rozměrových charakteristik opotřebení šroubovitého vrtáku je znázorněno na obr. 7 [12, 16].

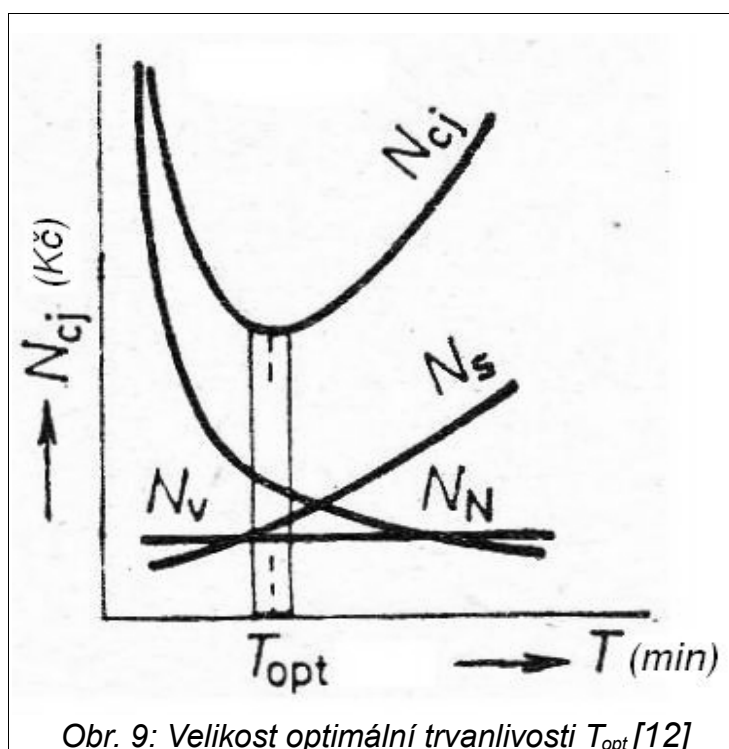


Z ekonomického hlediska je optimálním otupením břitu, největší přípustný otěr na jeho hřbetu a čele, při němž je nástroj ještě schopen pracovat. S vyšší mírou otupení se celkové výrobní náklady N_C snižují. Přitom se sice zvyšují náklady na ostření a tím i náklady na nástroj N_N , ale snižují se náklady na strojní práce N_S [9].





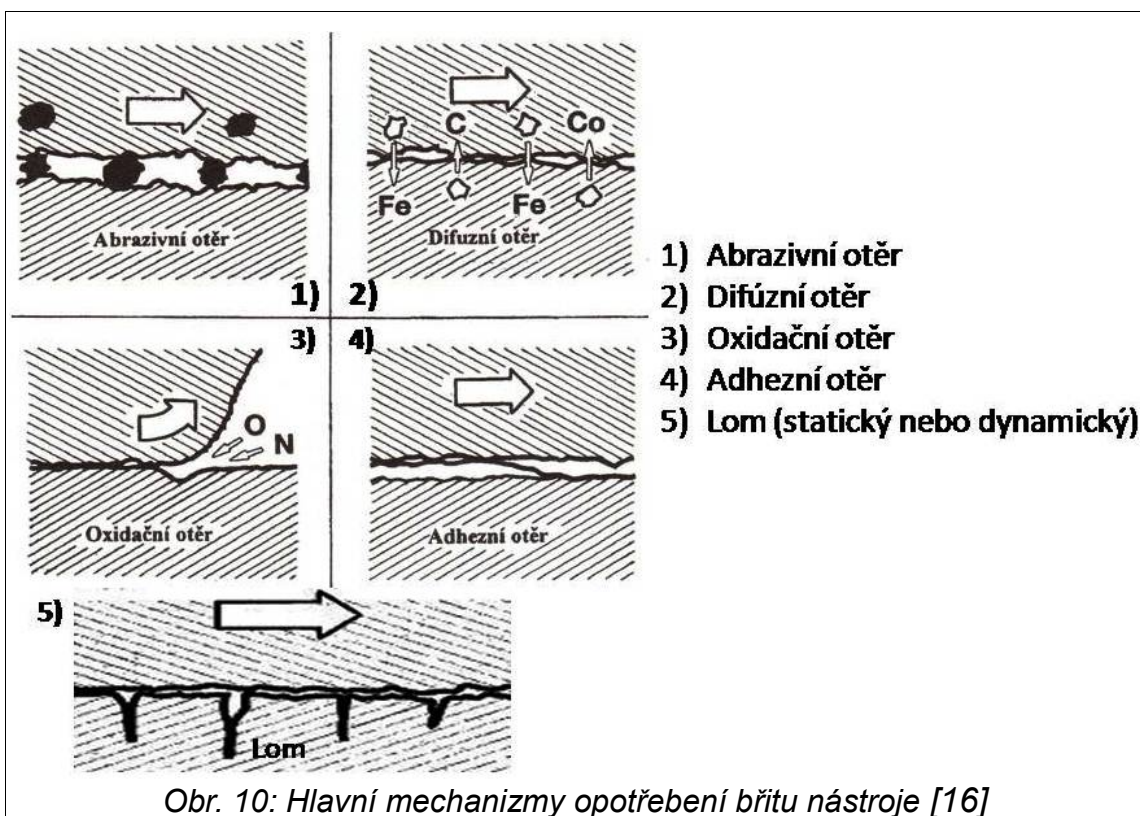
Optimální trvanlivost řezného nástroje je pro různé způsoby obrábění rozličná a je základním parametrem hospodárnosti obrábění. Náklady na strojní práci N_S s rostoucí trvanlivostí rostou, protože se snižuje řezná rychlost a tím se zvyšuje strojní čas t_{AS} . Náklady na nástroje N_N naopak klesají, protože se snižuje počet výměn (ostření) nástroje. Náklady na vedlejší práci se nemění. Na průběhu výsledných nákladů N_{Cj} je pak patrné jejich minimum, které odpovídá optimální trvanlivosti T_{opt} . Pro praxi uvažujeme vždy určitou oblast optimální trvanlivosti.



Obr. 9: Velikost optimální trvanlivosti T_{opt} [12]

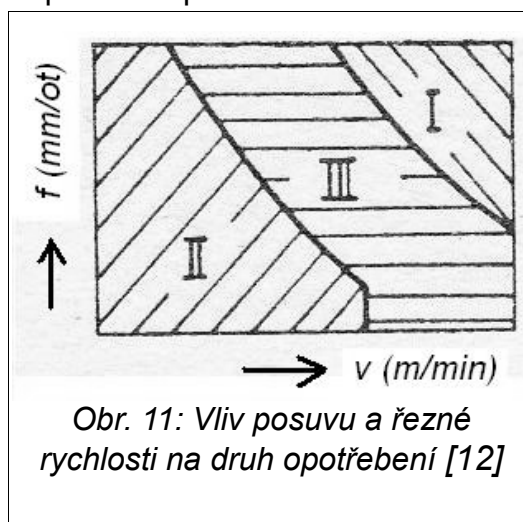
1.2.1 Opotřebení břitu řezného nástroje

V průběhu obrábění dochází postupně ke změně kvality a tvaru pracovních ploch břitu. To se nazývá opotřebení břitu, které může být způsobováno otěrem stykových ploch materiálu a břitu, nebo plastickou deformací břitu, nebo křehkým porušením materiálu břitu. Způsob otupování řezných nástrojů závisí kromě řezných podmínek na fyzikálních vlastnostech a na chemickém složení materiálu břitu i obrobku. K opotřebení břitu nástroje dochází jednotlivým nebo současným působením abraze, adheze, difuze, plastickou deformací, nebo lomem. Tyto základní mechanismy opotřebení břitu nástroje jsou uvedeny na obr. 10 [16, 17].



1.2.1.1 Průběh opotřebení břitu řezného nástroje

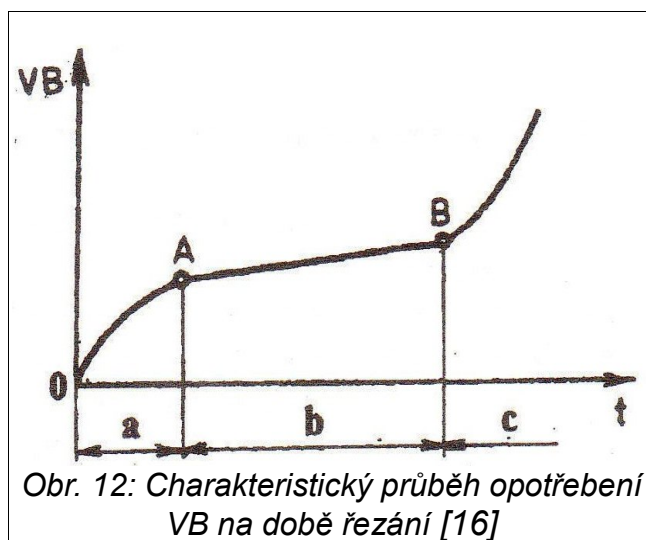
Opotřebení břitů probíhá většinou na hřbetě i čele současně, ale s různou intenzitou. Na obr. 10 je znázorněná závislost řezné rychlosti a posuvu. Při velkých řezných rychlostech a velkých posuvech dochází prakticky pouze k opotřebení na čele (oblast I). Při středně velkých rychlostech a posuvech probíhá opotřebení nástrojů jak na čele, tak i na hřbetě (oblast III). Při malých řezných rychlostech nebo malých posuvech dochází pouze k opotřebení na hřbetě nástroje (oblast II) [12].





Průběh opotřebení bříty v čase značně závisí na jeho tepelném zatížení. Po nasazení nového nebo přestřeleného nástroje, dochází při obrábění ihned k postupnému opotřebování.

Opotřebení se udává ve tvaru závislosti $VB=f(t)$, kde VB je šířka opotřebení na hřbetu nástroje a t je čas řezného procesu. Průběh této závislosti je charakteristický třemi oblastmi zobrazenými na obr. 12. V oblasti (a) je zrychlené záběhové opotřebení, které je způsobeno vysokým měrným tlakem na vrcholcích mikronerovností povrchu hřbetu nástroje a určitou defektností povrchové vrstvy. V oblasti (b) je lineární opotřebení s konstantní intenzitou a v oblasti (c) je zrychlené nadměrné opotřebení, většinou způsobené dosažením limitní teploty řezání, kdy začne výrazně klesat tvrdost řezného materiálu [16].



Obr. 12: Charakteristický průběh opotřebení VB na době řezání [16]

1.2.2 Optimalizace řezných podmínek při obrábění

Z ekonomických a kvantitativních důvodů se proces vrtání optimalizuje. Optimální řezné podmínky jsou takové, při nichž proběhne obrábění s minimálními náklady a maximální produktivitou. Produktivita se hodnotí podle počtu vyrobených součástí za jednotku času, nebo dle délky času potřebného na výrobu jedné součásti. Tento spotřebovaný čas se rozděluje do dvou složek a to na čas strojní t_{AS} , ve kterém probíhá vlastní řezný proces a na čas vedlejší t_{AV} , ve kterém se upíná, proměřuje a vyměňuje obrobek a obsluhuje stroj. To znamená, že zkracováním těchto časů se zvyšuje produktivita obrábění [12, 15].



Optimální řezné podmínky musejí odpovídat parametrům obráběcího stroje, musejí zaručit dodržení požadavků na výrobek a musejí být voleny co nejhospodárněji. Dosažení optimálních řezných podmínek je také omezováno tuhostí soustavy - stroj, nástroj, obrobek, přípravek, a to hlavně při hrubovacích operacích [12].

Obrobitelnost materiálu je souhrn technologických vlastností obráběného materiálu a posuzuje se z několika hledisek. Při hrubování je to řezná rychlost, řezný odpor, utváření třísek a v poslední řadě drsnost obrobené plochy. Při obrábění načisto je to v první řadě drsnost obrobené plochy, řezná rychlost, utváření třísek a řezný odpor. Vzhledem k hospodárnému obrábění se v praxi obrobitelnost materiálu posuzuje především podle řezné rychlosti [12, 15].

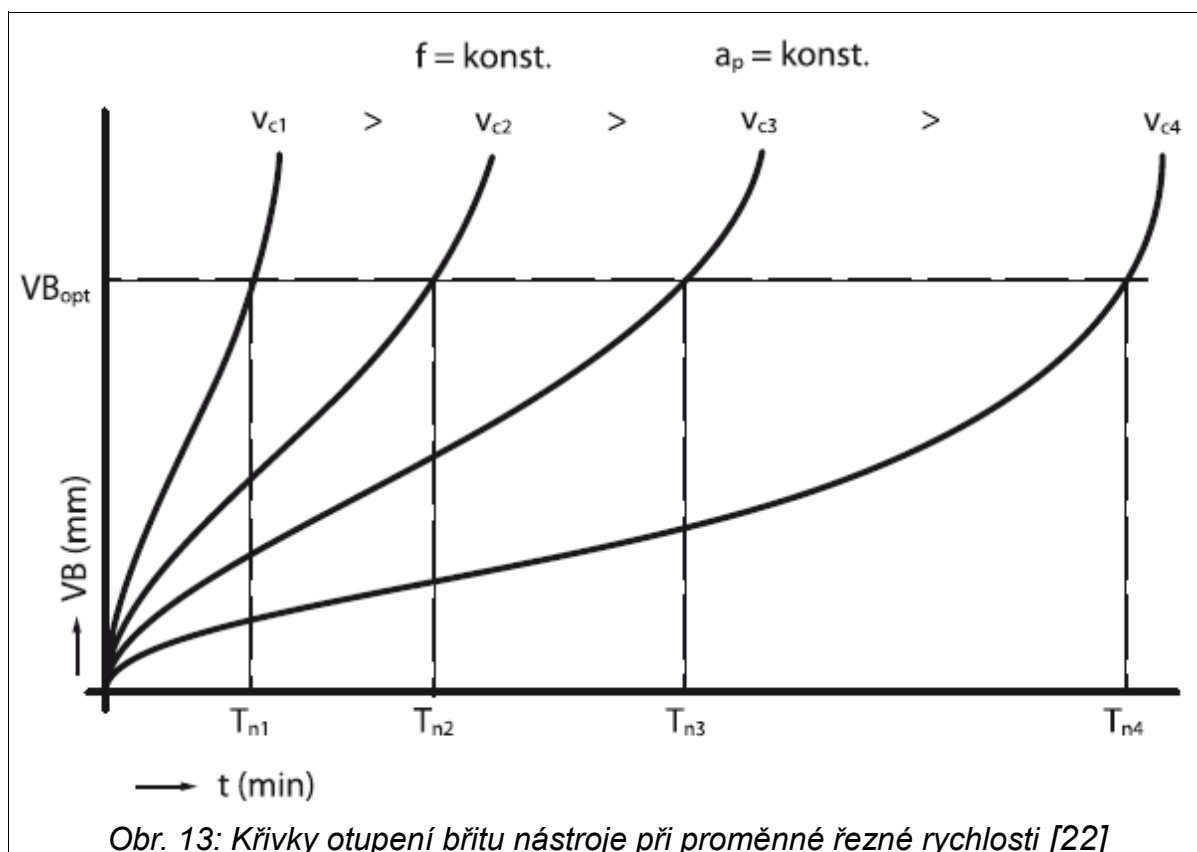
1.2.3 Analýza existujících metod zkoumání trvanlivosti

Zkoušky trvanlivosti se rozdělují dle času trvání na dlouhodobé a krátkodobé. A krátkodobé zkoušky se ještě dále dělí dle principu a použitého kritéria na přímé a nepřímé. Nepřímé metody vycházejí ze známého vztahu mezi opotřebením bříty a charakteristickými parametry řezného procesu. A jsou založeny převážně na zjišťování energetických parametrů.

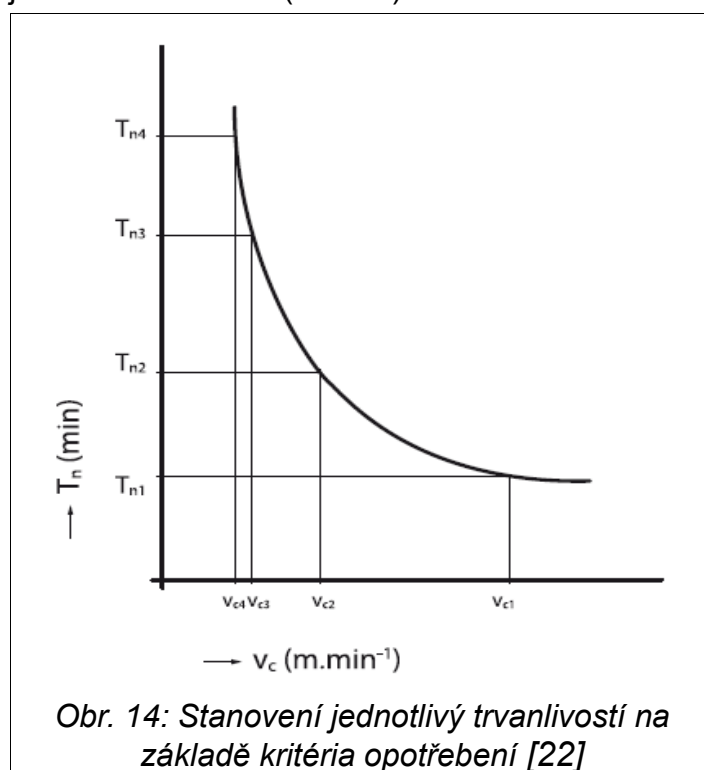
1.2.3.1 Dlouhodobé zkoušky trvanlivosti

Dlouhodobá zkouška trvanlivosti je v podstatě jen jedna. Kritériem je zde hodnota řezné rychlosti. Tato zkouška se provádí soustružením, vrtáním nebo frézováním dohodnutými konstantními řeznými parametry, druhem řezného nástroje a geometrií bříty až do optimálního otupení bříty, při různých řezných rychlostech. Tato zkouška je považována za základní a podle ní se posuzuje míra objektivit ostatních zkoušek obrobitelnosti. Lze ji využít i k určování řezivosti nástrojů. Ale její nevýhodou je velká spotřeba obráběného materiálu a časová náročnost zkoušení.

U této dlouhodobé zkoušky trvanlivosti se nejprve změří časový průběh opotřebení na hřbetu nástroje VB pro několik hodnot rychlostí při konstantních řezných podmínkách a sestrojí se křivky otupení, jako na obr. 13.

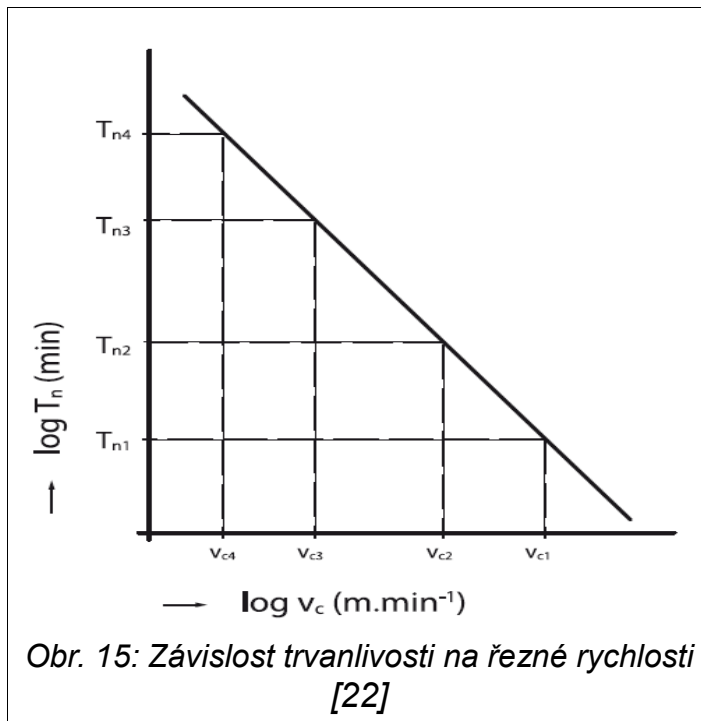


Určí se kritérium opotřebení VB_{opt} a tím se stanoví pro každou řeznou rychlost odpovídající trvanlivost břitu (obr. 13).





Poté se sestojí závislost $T_n = f(v_c)$ v logaritmických souřadnicích a pro vybranou trvanlivost je možné stanovit index obrobiteľnosti při srovnání řezné rychlosti zkoumaného materiálu s řeznou rychlostí etalonového materiálu (obr. 15) [12, 22].



1.2.3.2 Krátkodobé zkoušky trvanlivosti

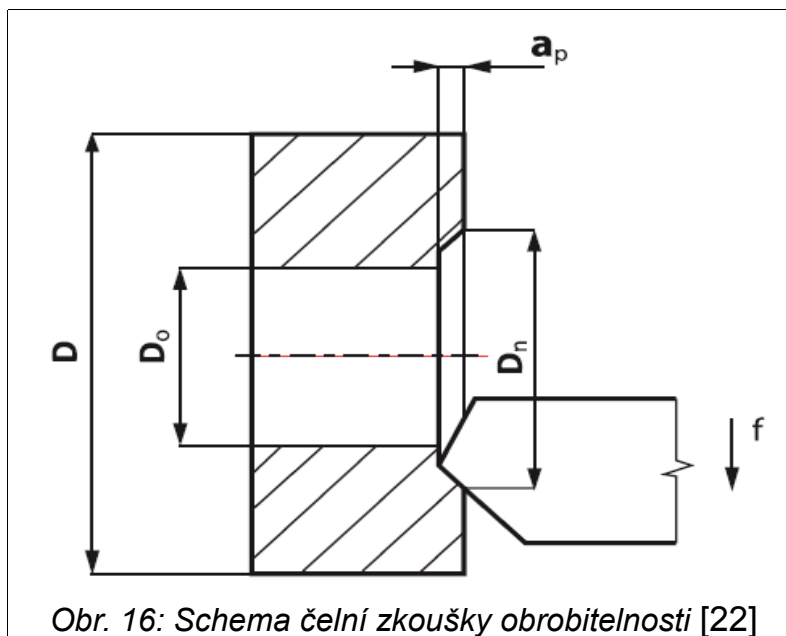
Krátkodobé zkoušky trvanlivosti jsou méně objektivní, ale mají velkou výhodu v mnohem kratší době trvání a nižší spotřebě materiálu. Tyto zkoušky jsou vhodné pro rychlé rozřídění skupiny materiálu podle stupně obrobiteľnosti pro ověření eventuální změny stupně obrobiteľnosti u jednotlivých dodávek stejného druhu materiálu, nebo pro rychlé určení relativního stupně obrobiteľnosti u nově vyvíjených materiálů.

Mezi přímé krátkodobé zkoušky obrobiteľnosti patří čelní krátkodobá zkouška, mikrozkuška trvanlivosti, snížení míry opotřebení, použití nástroje se sníženou řezivostí a zvýšení řezné rychlosti [9, 22].

- Při čelní krátkodobé zkoušce se soustruží mezikružím na čele disku o průměrech D_0 a D . Soustruží se na průměru D_0 při konstantních otáčkách, posuvu a hloubce řezu. Řezná rychlost s rostoucím obráběným průměrem



narůstá. A měří se, na jakém průměru D_n dosáhne nástroj předem stanovené hodnoty opotřebení (obr. 16). Kritériem je potom porovnání řezné rychlosti zkoumaného materiálu s řeznou rychlostí etalonového materiálu.



Obr. 16: Schema čelní zkoušky obrobiteľnosti [22]

- Mikrozkuška obrobiteľnosti je vhodná pouze pro nástroje s pečlivě lapovanými funkčními plochami. Tím se výrazně sníží velikost opotřebení v počáteční fázi obrábění a lze tak získat hodnoty pro sestavení závislosti $T_n = f(v_c)$ velmi rychle při malé spotřebě obráběného materiálu. Tato metoda vychází z hodnot opotřebení na hřbetu $VB = 0,1 \text{ mm}$.
- Zkuška za snížené míry opotřebení vychází z dlouhodobé zkoušky obrobiteľnosti, ale pro její časovou náročnost se volí kritérium obrobiteľnosti vc_5 , to je obrábění řeznou rychlostí po dobu 5 minut. A míra opotřebení je 0,2 až 0,3 mm, ale jiný autor uvádí míru opotřebení v rozmezí 0,1 až 0,25 mm. Tato zkuška ovšem nezaručuje plnou objektivitu hodnocení indexu obrobiteľnosti.
- Použitím vhodného tepelného zpracování můžeme snížit řezivost nástroje a dosáhnout tak rychlejšího opotřebení v porovnání s původním nástrojem za stejných řezných podmínek. Tím opět dosáhneme krátkodobosti zkoušky.



- Použitím zvýšené řezné rychlosti než je doporučena, dosáhneme snížení trvanlivosti bříty nástroje a tím i krátkodobosti zkoušky.

Mezi nepřímé krátkodobé metody zjišťování obrobitelnosti patří dynamická metoda, měření tvrdosti obrobku, mikrometrická metoda, Leyensetterova metoda, vrtání při konstantním tlaku, metoda pomocí teploty řezání a měření hloubky zpevněné vrstvy.

- Podstata dynamické metody je založená na teoreticky dokázané a experimentálně ověřené skutečnosti, že houževnatější materiál, při jinak naprosto stejných řezných podmínkách i ostatních parametrech procesu řezání, klade větší měrný odpor. Předem si otestujeme dlouhodobými zkouškami referenční (etalonový) materiál a pak po obrábění vzorku stanovíme závislosti a porovnáním vytvoříme patřičné převodové mechanismy, pomocí kterých jsme schopni dostatečně přesně i časově a ekonomicky výhodněji stanovit obrobitelnost krátkodobou zkouškou.
- Při měření tvrdosti obrobku se do materiálu vtlačí kužel z tvrdokovu a měří se průměr vtisku etalonového materiálu a zkoumaného materiálu. Index obrobitelnosti se poté vypočítá jako podíl průměru vtisku do etalonového materiálu ku průměru vtisku do zkoumaného materiálu. Výhodou této zkoušky je nenáročnost na velikost zkoumaného i etalonového materiálu a možnost využití klasických tvrdoměrů.
- Mikrometrická metoda je založená na porovnání rozdílu řezných rychlostí zkoumaného a etalonového materiálu při stejných hodnotách drsnosti povrchu. Toto měření je pouze doplňkové a nelze jej použít samostatně. Určení obrobitelnosti touto metodou je v některých případech velice obtížné, protože materiály mohou mít odlišnou závislost mezi řeznou rychlostí a drsností povrchu.
- Metoda porovnání třísky je založená na porovnání tvaru a druhu třísky. Měří se poloměr svinované třísky, nebo koeficient přechování třísky u zkoumaného a etalonového materiálu za stejných řezných podmínek. Tato metoda stanovení obrobitelnosti je pouze doplňková a nelze ji použít samostatně. Používá se převážně při obrábění daného materiálu na automatech nebo poloautomatech.



- Leyensetterova metoda je obdobou Charpyho kladiva. Na kyvadle je připevněn nůž, který při spuštění z určité výšky vyrýpne do vzorku žlábk. Veličina, která charakterizuje index obrobitelnosti, je velikost žlábků, případně hloubka vniknutí nože do obou materiálů (zkoumaného i etalonového). Index obrobitelnosti je podíl hloubky vniknutí nože do zkoumaného materiálu a hloubky vniknutí nože do referenčního materiálu.
- Metoda vrtání při konstantním tlaku spočívá v měření hloubky vrtaného otvoru až do dosažení stanovené hodnoty otupení hřbetu vrtáku VB.
- Metoda vrtání konstantní posuvovou silou při zvolené řezné rychlosti a průměru nástroje (vrtáku), je obdobou metody vrtání při konstantním tlaku. Vrtá se vždy do konstantní hloubky a současně se měří čas vrtání. Kritériem pro stanovení obrobitelnosti je buď čas vrtání, nebo častěji velikost posuvu. Aby se vyloučil vliv příčného ostří, vrtá se obvykle do předvrtaných otvorů. Čím vyšší je dosažený posuv při konstantních pracovních podmínkách, tím lepší je pak obrobitelnost daného materiálu. Výhodou této metody je velká rychlost zkoušky.
- Princip metody měření pomocí teploty je založen na měření teploty obrábění (střední teploty řezání) etalonového a zkoumaného materiálu při stejných pracovních podmínkách. Tato metoda je velice objektivní, ale její nevýhodou je, že jí můžeme použít pouze pro určování obrobitelnosti vždy jen jedné skupiny materiálů. Čím nižší je teplota řezání, tím lepší je obrobitelnost zkoumaného materiálu.
- Podstatou metody měření hloubky zpevněné vrstvy je měření mikrotvrdosti zpevněné vrstvy těsně pod obrobeným povrchem etalonového a testovaného materiálu. Index obrobitelnosti je dán podílem hloubky zpevněné vrstvy etalonového materiálu a hloubky zpevněné vrstvy testovaného materiálu [22].

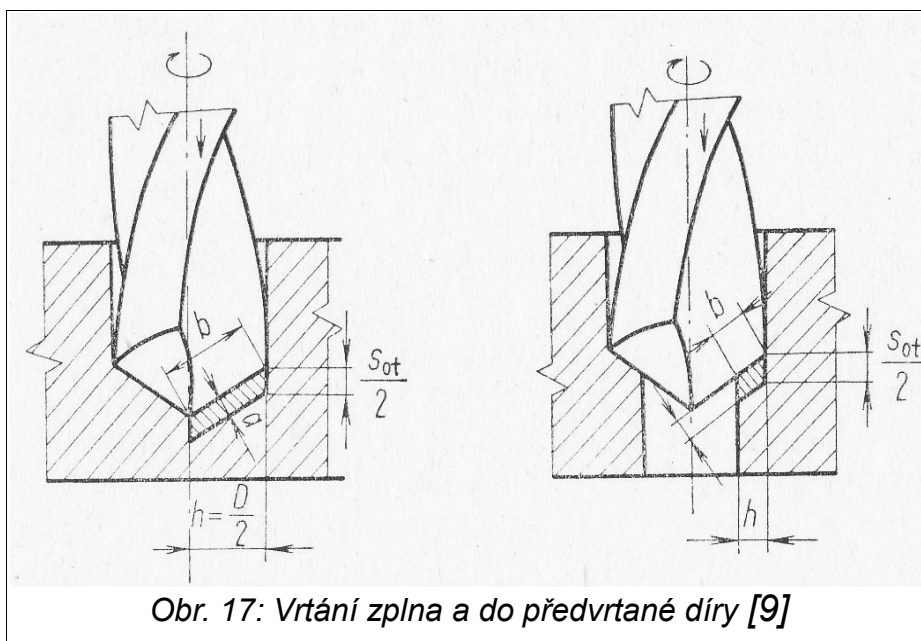
1.3 Technologie vrtání

Historicky je vrtání jednou z nejstarších výrobních metod. Používá se k obrábění vnitřních rotačních ploch zpravidla dvoubřitým nástrojem a slouží ke zhotovení nebo zvětšení děr kruhového průřezu. Dnes je vrtání jedním z nejpoužívanějších metod obrábění.



1.3.1 Charakteristika vrtání

Vrtání je způsob třískového obrábění, při kterém nástroj vykonává hlavní řezný pohyb, který je rotační a relativním pohybem ve směru osy nástroje vykonává posuv. Jsou však možné i jiné varianty (např. vrtání na soustruhu nebo frézce).



Obr. 17: Vrtání zplna a do předvrtané díry [9]

Vrtat lze do plného materiálu nebo můžeme rozšiřovat předvrtané či předlité otvory, případně lze vrtat na jádro, kdy nástroj odebrá jenom část materiálu ve formě mezikruží. Vrtáním lze obrábět i tvarové rotační plochy, jako je např. sražení hran.

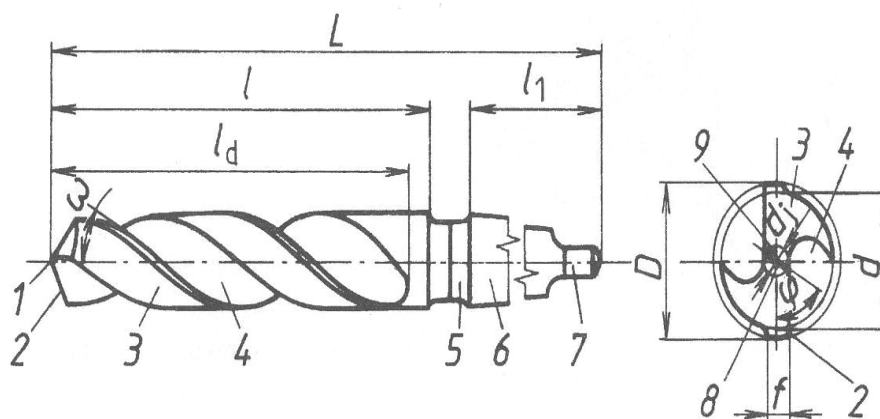
Zvláštností vrtání a dalších osových operací, mezi které patří i vyhrubování a vystružování, je to, že řezná rychlost se mění od středu nástroje, kde je nulová, do maximální na obvodě nástroje. Řeznou rychlostí při vrtání se v praxi běžně rozumí obvodová rychlost na největším průměru nástroje a udává se v metrech za minutu [m/min]. Posuv při vrtání je uváděn v milimetrech na otáčku nástroje [mm/ot]. [9 11, 13].

Nástroje pro vrtání se nazývají vrtáky a dělíme je podle tvaru a způsobu provedení na kopinaté, šroubovitě, středící, dělové (hlavové), vrtací hlavy a sdružené vrtáky.

Nejčastěji používané nástroje pro výrobu válcových děr jsou šroubovitě vrtáky. Mají většinou dva břity a dvě drážky ve tvaru šroubovice pro usnadnění odchodu



třísky. Válcová fazetka na vedlejším ostří zajišťuje vedení v díře a jeho kuželový tvar s menším průměrem u stopky snižuje tření v díře. Pro zvýšení tuhosti vrtáku se průměr jádra zvětšuje směrem ke stopce. Vrták má dvě hlavní ostří položená symetricky k ose vrtáku a ty jsou spojeny na hrotu vrtáku příčným ostřím [9, 11].



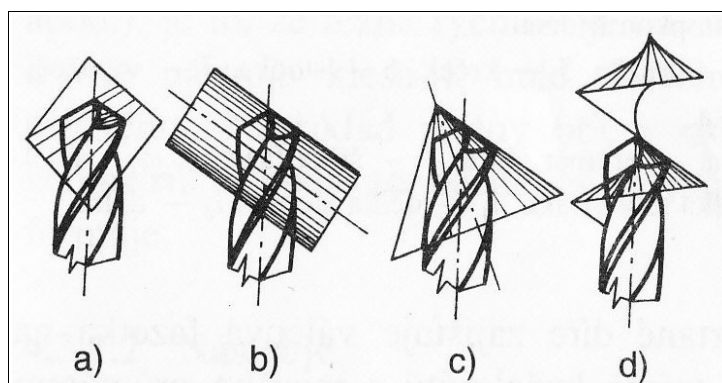
Obr. 4.53. Šroubovitý vrták s kuželovou stopkou Morse

1 – hrot, 2 – hlavní ostří, 3 – zub, 4 – drážka, 5 – krček, 6 – stopka, 7 – vyrážec, 8 – příčné ostří, 9 – jádro, 10 – fazetka

D – průměr vrtáku, d – průměr tělesa, d_j – průměr jádra, f – šířka fazetky, φ – úhel příčného ostří, L – délka vrtáku, l – délka těla vrtáku, l_1 – délka stopky, l_d – délka drážky, ω – úhel stoupání šroubovice

Obr. 18: Šroubovitý vrták s kuželovou stopkou [11]

Při ostření vrtáků je třeba dbát na to, aby obě hlavní ostří byla symetrická podle osy vrtáku a také, aby měla správnou prostorovou geometrii (podbroušení) obou hlavních hřbetů na špičce vrtáku. Hřbet vrtáku mohou tvořit plochy rovinné (a), válcové (b), strmé kuželové (c), nebo šroubovitě (d). Jejich tvar závisí na vzájemné poloze a na relativním pohybu vrtáku a brousícího kotouče.

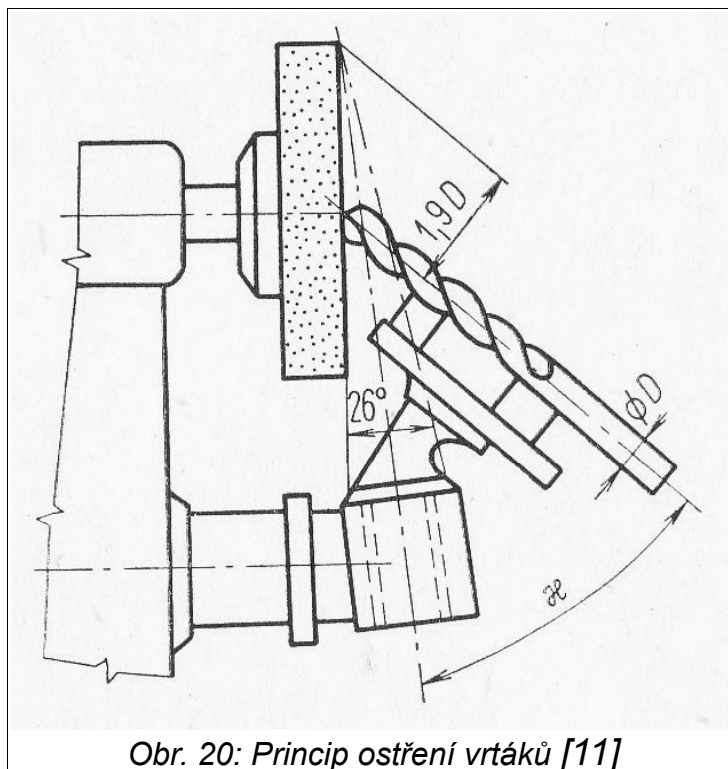


Obr. 19: Způsoby ostření šroubovitěho vrtáku [11]



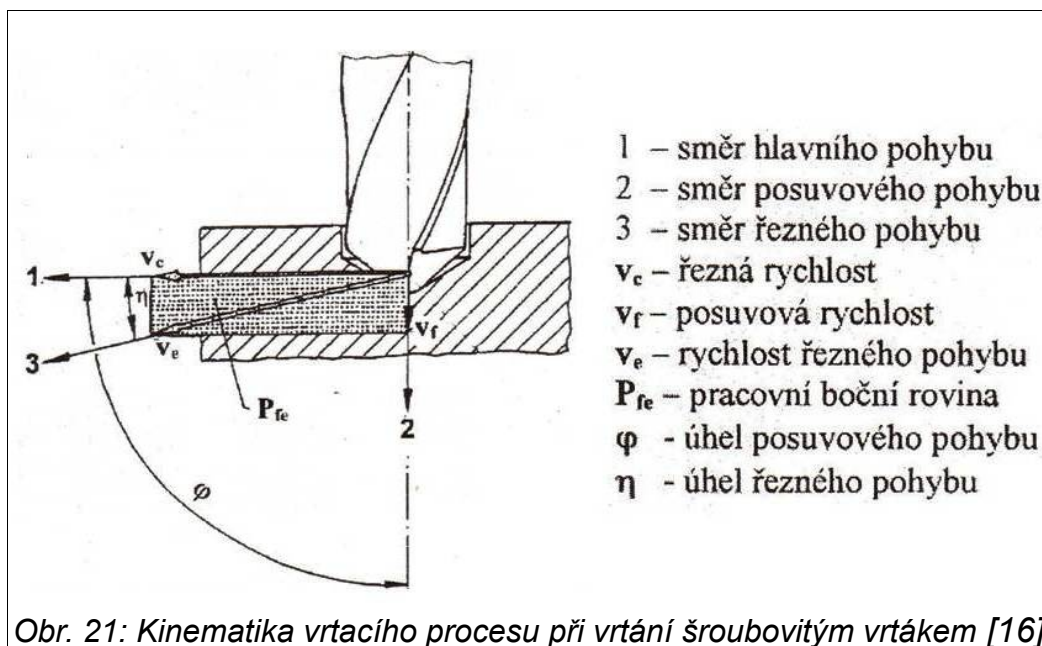
Pokud není vrták dobře naostřen, je vrtaná díra větší, zhorší se drsnost povrchu díry a také se sníží trvanlivost nástroje o 20 až 50%. Proto je kvalitní strojní naostření vrtáku bezpodmínečným požadavkem pro dosažení optimálních řezných podmínek i pro splnění kvalitativních parametrů vrtání.

Pro ostření vrtáků jsou určeny speciální ostříčky. Princip ostření vrtáků na jedné z nich je znázorněn na obr. 20, kde úhel κ [kappa] je úhel nastavení hlavního ostří vrtáku [9, 12].



1.3.2 Kinematika a parametry procesu vrtání

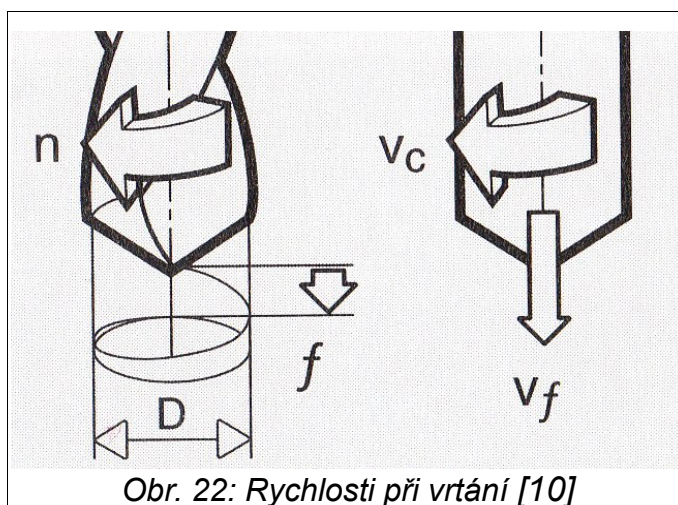
Při práci na vrtačkách, vyvrtávačkách, jednoúčelových vrtacích strojích a na souřadnicových vrtačkách se nástroj otáčí kolem své osy a současně se axiálně posouvá. Při vrtání na soustruhu vykonává rotační pohyb obrobek a vrták se pouze axiálně vysouvá s pinolou koníku do obrobku [9].



Úroveň řezných podmínek při vrtání se pohybuje v širokém rozsahu v závislosti na druhu nástroje a je omezena nepříznivými pracovními podmínkami vrtáku, hlavně značným tepelným zatížením břitů. Při vrtání se řezná rychlost mění podél břitu od maxima na obvodu vrtáku do nuly v ose otáčení. Dále se také mění geometrie břitu, a to především úhel čela, jehož velikost je dána úhlem stoupání šroubovitě drážky vrtáku [11, 13].

1.3.2.1 Definice veličin při vrtání

- Mezi kinematické veličiny při vrtání patří posuvová a řezná rychlost, rychlost řezného pohybu a posuv na zub.





výpočet řezné rychlosti $v_c = \frac{\pi * D * n}{1000} \quad [m * min^{-1}]$

výpočet rychlosti posuvu $v_f = f * n \quad [mm * min^{-1}]$

výpočet rychlosti řezného pohybu $v_e = \sqrt{v_c^2 + v_f^2} \quad [m * min^{-1}]$

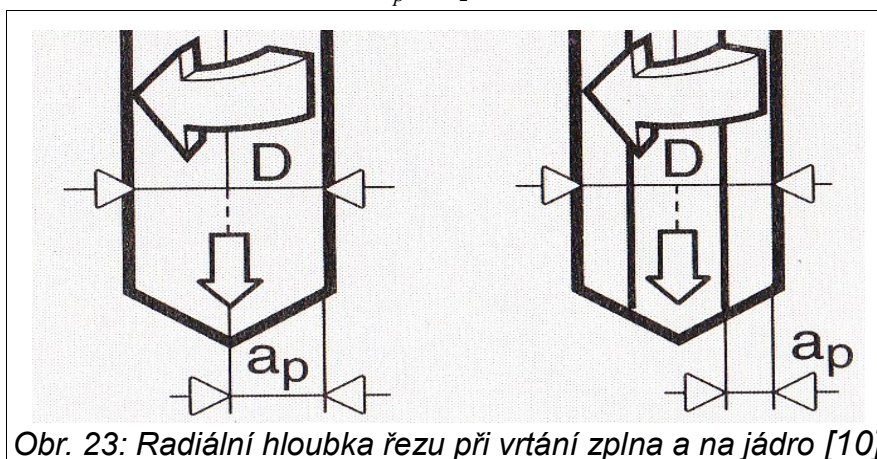
výpočet posuvu na zub $f_z = \frac{f}{z} \quad [mm]$

- Dalšími parametry při vrtání jsou radiální hloubka řezu, průřez třísky, síly vznikající během obrábění a jednotkové strojní časy.

výpočet radiální hloubky řezu při vrtání zplna $a_p = \frac{D}{2} \quad [mm]$

výpočet radiální hloubky řezu při vrtání na jádro $a_p = \frac{D - d}{2} \quad [mm]$

výpočet průřezu třísky $A = a_p * f_z \quad [mm^2]$



Obr. 23: Radiální hloubka řezu při vrtání zplna a na jádro [10]

výpočet výkonu obrábění $V = A * z * v_c * 1000 \quad [mm^3 * min^{-1}]$

- kde: D [mm] ... průměr nástroje
d [mm] ... průměr předvrtané díry
n [min⁻¹] ... otáčky nástroje
f [mm] ... posuv nástroje na jednu otáčku
z [-] ... počet břitů (zubů) nástroje
a_p [mm] ... radiální hloubka řezu (šířka řezu)
f_z [mm] ... posuv na zub
A [mm²] ... průřez třísky

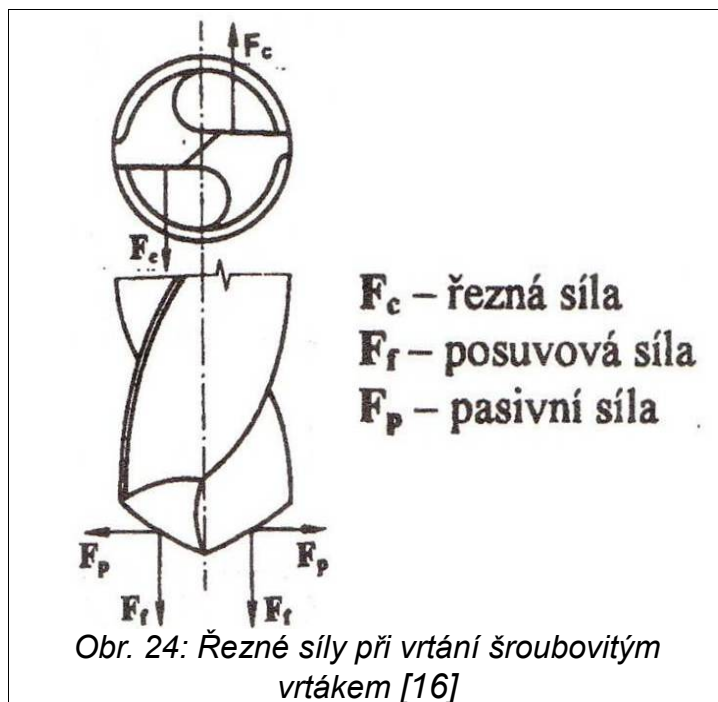


- Krouticí moment, řeznou a posuvovou sílu je možné vypočítat pomocí empirických vztahů, které uvažují oba břity vrtáku.

výpočet krouticího momentu $M_k = C_M * D^{1+x_{Fc}} * f^{y_{Fc}} \quad [Nm * 10^{-3}]$

výpočet řezné síly $F_c = C_{Fc} * D^{x_{Fc}} * f^{y_{Fc}} \quad [N]$

výpočet posuvové síly $F_f = C_{Ff} * D^{x_{Ff}} * f^{y_{Ff}} \quad [N]$



kde: C_{Fc}, C_{Ff} [-] ... konstanty pro výpočet sil

C_M [-] ... konstanta pro výpočet krouticího momentu

x_{Fc}, x_{Ff} [-] ... exponent vyjadřující vliv průměru vrtáku

y_{Fc}, y_{Ff} [-] ... exponent vyjadřující vliv posuvu na otáčku

D [mm] ... průměr nástroje

f [mm] ... posuv nástroje na jednu otáčku

- Řezný výkon při vrtání šroubovitým vrtákem se určí ze vztahu:

$$P_c = \frac{F_c * v_c}{60 * 2 * 10^3} = \frac{F_c * v_c}{12 * 10^4} \quad [kW]$$

kde: F_c [N] ... řezná síla

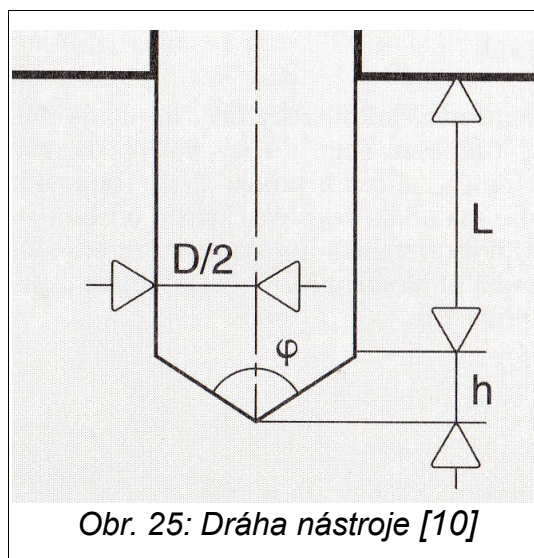
v_c [m*min⁻¹] ... otáčky nástroje



- Jednotkový strojní čas t_{AS} při vrtání šroubovým vrtákem se dle obr.30, určí vztahem:

$$t_{AS} = \frac{L_c}{v_f} = \frac{l_n + L + l_p}{n * f} \quad [min]$$

$$l_p = \frac{D}{2} * \cotg\left(\frac{\varphi}{2}\right)$$



kde: L_c [mm] ... celková dráha nástroje
 L [mm] ... délka díry
 l_n [mm] ... délka náběhu nástroje
 l_p [mm] ... délka přeběhu nástroje (délka špičky vrtáku - h)
 φ [°] ... úhel špičky vrtáku
 v_f [mm*min⁻¹] ... rychlost posuvu nástroje
 f [mm] ... posuv nástroje na jednu otáčku
 n [min⁻¹] ... otáčky nástroje [10, 16]

1.3.3 Měření sil a momentů při vrtání

Síly, popř. krouticí momenty vyvolané procesem řezání, je možné určit metodou nepřímého měření nebo metodou přímého měření.

Pro nepřímé měření se používá wattmetr, kterým změříme výkon elektromotoru obráběcího stroje P_c při procesu vrtání a výkon nezatíženého stroje P_0 . Užitečný výkon stroje $P_{už}$ se vypočítá jako rozdíl výkonů zatíženého



a nezatíženého stroje $P_{už} = P_C - P_0$ [kW] . A z toho lze vypočítat řeznou sílu dle

vzorce $F_c = \frac{6 \cdot 10^4 \cdot P_{už}}{v}$ [N] . Ale uvedený způsob měření řezné síly F_c je

nepřesný, protože zahrnuje i výkon posuvové složky řezné síly a neuvažuje se různá účinnost obráběcího stroje na jednotlivých stupních otáček.

Nepřímé měření řezné síly a krouticích momentů je využíváno pouze v průmyslové praxi. Ve výzkumných laboratořích se měří velikosti řezných sil a krouticích momentů výhradně přímým způsobem měření a to pomocí dynamometrů.

Dynamometry jsou principiálně založené na měření deformace nástroje, většinou se však používají elementy spojené s nástrojem nebo obrobkem. Deformace tohoto elementu musí být úměrná zatěžující síle, to znamená, že nesmí překročit mez pružnosti. Podle způsobu měření deformace se používají dynamometry mechanické, hydraulické, pneumatické a elektrické (indukční, odporové, kapacitní, piezoelektrické) [17].



2 Experimentální část

2.1 Popis strojů a měřících přístrojů

Obrábění bylo provedeno na vrtačce VR4 a ostření vrtáků na brusce N1. Hlavní rozměry a technické parametry vrtačky VR 4 a brusky N1 jsou uvedené v příloze 1. K měření byly použity tyto přístroje: dynamometr s tenzometrickými snímači, nástrojová lupa Brinell, mikroskop Arsenal SZP 3112-T a profiloměr Mitutoyo SV-2000 N2.

Všechny použité stroje a měřicí přístroje jsou vybavením laboratoří KOM TU v Liberci.

2.1.1 Otočná vrtačka VR4 [21]

Obrábění bylo realizováno na vrtačce značky MAS s typovým označením VR4, která je zobrazená na obr. 26. Tento stroj byl vyroben v roce 1948 k obrábění středně velkých obrobků kusové výroby, ale při použití přípravků je vhodný i pro sériovou výrobu.

Vřeteník je poháněn přírubovým elektromotorem upevněným na skříni vřeteníku. V rychlostní skříni lze řadit dvanáct stupňů otáček vřetená a výměnnými koly lze ještě nastavit zvýšenou nebo sníženou řadu otáček vřetená. Tato vrtačka má deset strojních posuvů i možnost ručního hrubého přestavení a jemného vysouvání vřetená. Požadovanou hloubku vrtání lze přesně nastavit na stupnici. Otáčení pláště na sloupu a pojezd vřeteníku po ramenu je ruční. A svislé přestavování ramena po plášti je strojní. Zajištění ramena, vřeteníku a otočného pláště v nastavených polohách, je ruční pákou.

Rozměry a technické parametry vrtačky VR4:

- Otáčky vřetená:

počet stupňů	12	[-----]
rozsah otáček v normální řadě	45–2000	[ot/min]

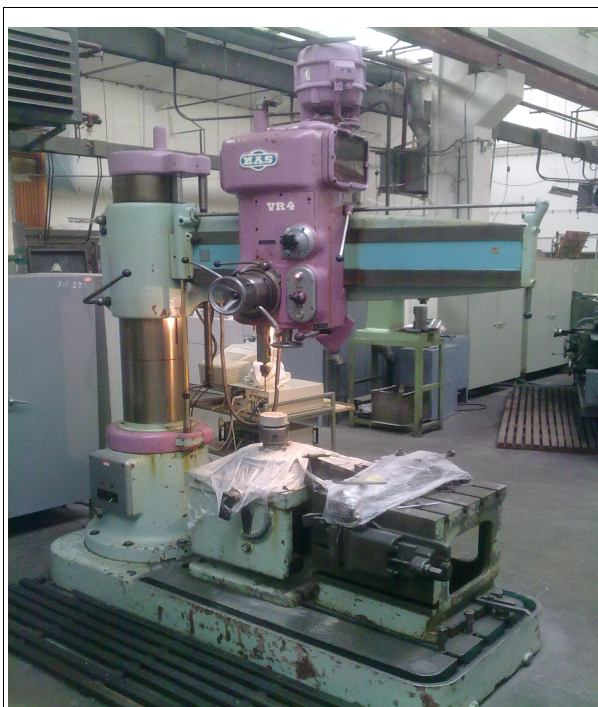
- Posuvy vřetená:

počet	10	[-----]
rozsah	0,025–1,58	[mm/ot]



- Elektromotor a pohon vřetena:

otáčky	1420	[ot/min]
výkon	3	[kW]
- Hmotnost stroje s běžným příslušenstvím 2600 [kg]
- Celková výška stroje 2860 [mm]



Obr. 26: Otočná vrtačka VR4

2.1.2 Nástrojová univerzální bruska N1 [21]

Přeostření vrtáků bylo provedeno na brusce typového označení N1, která je zobrazená na obr. 27. Touto bruskou se ostří břity menších řezných nástrojů, jako jsou například soustružnické nože, vrtáky, výstružníky a frézy.

Vřeteník je poháněn plochým řemenem od elektromotoru a nelze jím otáčet. Brusné vřeteno má dva konce, ve kterých jsou uchycené výměnné trny s brusnými kotouči. Pracovní stůl je pohyblivý a lze jej ovládat ručně. Na jeho upínací plochu můžeme upevnit přípravky na upnutí nástrojů.

Rozměry a technické parametry brusky N1:

- Průměr brusného kotouče 50-200 [mm]
- Otáčky vřetena 3200, 4800 [ot/min]



- Elektromotor 1,1 [kW]
- Rozměry stroje (délka x šířka) 1280 x 760 [mm]



Obr. 27: Nástrojová univerzální bruska N1

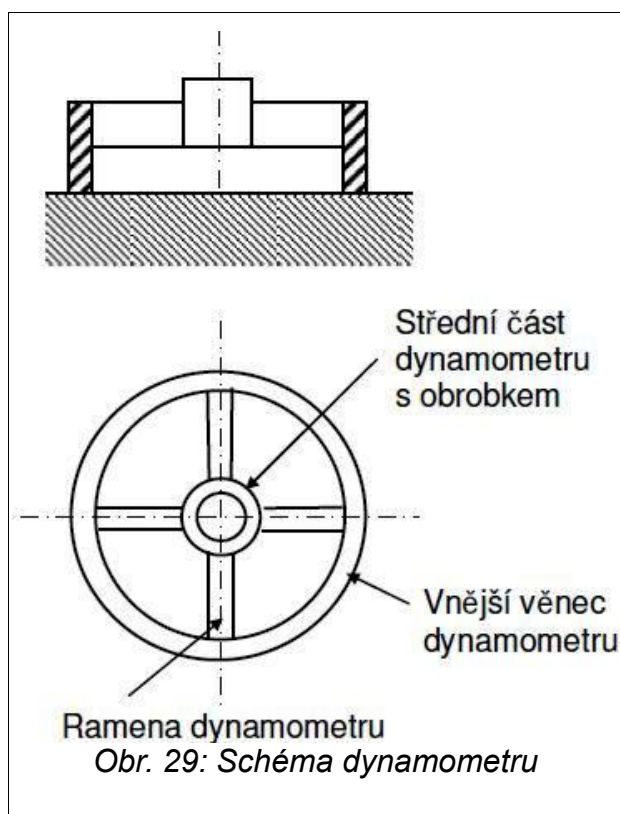
2.1.3 **Dynamometr s tenzometrickými snímači**

Dynamometr s tenzometrickými (odporovými) snímači zkonstruovaný na KOM TU v Liberci byl použit pro měření řezných sil F_c a krouticích momentů M_k .



Obr. 28: Odporový dynamometr

U elektrických odporových dynamometrů se pro měření deformace využívá odporových tenzometrů, které snímají změny odporu. Tato změna v odporu je způsobena deformací vodiče nebo polovodiče. Deformační element a odporový tenzometr jsou pevně spojeny a deformují se společně. Kovové tenzometry se také používají k měření rozsáhlých deformačních polí složitě namáhaných mechanických konstrukcí [18].

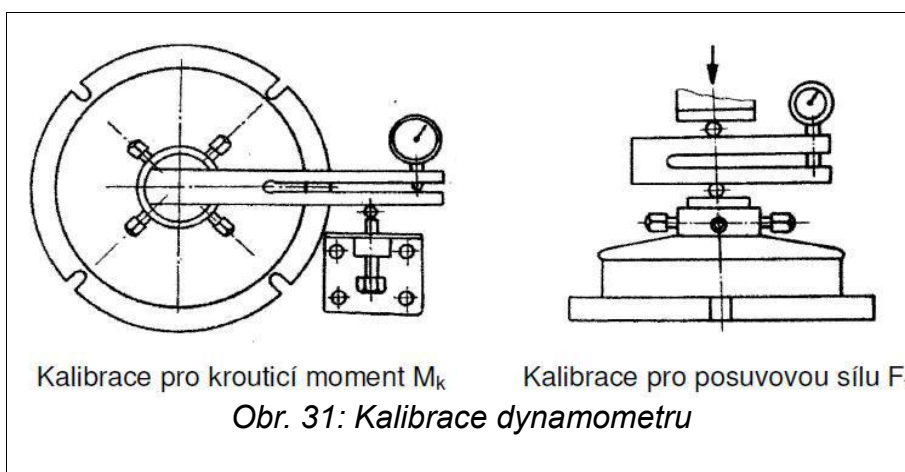


Větec pevně spojený se stolem vrtačky tvoří těleso odporového dynamometru. Celé těleso je vyrobené z jednoho kusu oceli. Na střední část pevně spojenou s věncem čtyřmi rameny se upíná obrobek. Tato ramena jsou tvořena pružnými elementy dynamometru a mají na sobě nalepené tenzometrické snímače.



Obr. 30: Souprava pro měření sil a krouticích momentů

Kompletní sestava pro měření složek řezné síly a krouticího momentu obsahuje dynamometr s měřicí tenzometrickou aparaturou TDA – 3 a osobní počítač, který zpracovává přivedený signál v programu INMES. Aby tato soustava správně fungovala, je nutné ji zkalibrovat. Kalibrace se provádí pomocí silové vidlice pro posuvovou sílu F_f i pro krouticí moment M_k .





2.1.4 Nástrojová lupa Brinell

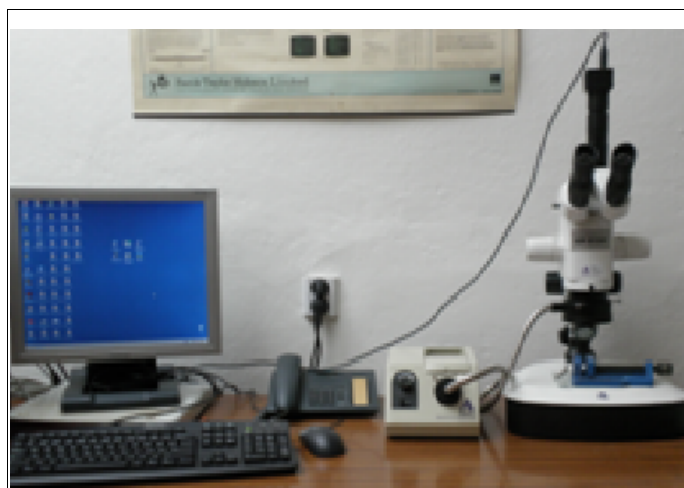
Přímo na pracovišti bylo měřeno opotřebení břitů šroubových vrtáků nástrojovou lupou Brinell. Tato lupa má stupnici rozdělenou po 0,05 mm a zvětšuje 24x. Velkou výhodou této lupy je rychlé měření s uspokojivou přesností.



Obr. 32: Nástrojová lupa Brinell

2.1.5 Mikroskop Arsenal SZP 3112 – T

Mikroskop Arsenal typu SZP 3112 – T s připojenou laboratorní kamerou LABO 3MP byl použit pro pořízení snímků šířky opotřebení na hřbetu vrtáku VB. Tato kamera LABO je propojena s osobním počítačem a snímky se zaznamenávají v programu MINISEE. Tato sestava je znázorněna na obr. 33.



Obr. 33: Mikroskop Arsenal SZP 3112-T s kamerou LABO 3MP a počítač



2.1.6 Laboratorní profiloměr MITUTOYO SV – 2000 N2

Drsnost povrchu ve vyvrtaných dírách byla měřena profiloměrem Mitutoyo SV – 2000 N2 propojeným s osobním počítačem s nainstalovaným programem SURFPARK-SV (verze 1.100), který byl speciálně navržen pro ovládání a zpracování hodnot z tohoto profiloměru. Tento program se ovládá pomocí ikon, výstupem jsou grafy i text. Tímto zařízením lze měřit výškové i délkové hodnoty drsnosti povrchu. Jeho rozměry a technické parametry jsou uvedené v příloze 2.



Obr. 34: Laboratorní profiloměr MITUTOYO SV – 2000 N2

2.2 Příprava zkušebních vzorků

Vzorky geopolymérů byly zhotoveny v prostorách laboratoře katedry materiálů (KTM) na TU v Liberci a to ve dvou sadách, s různými koncentracemi úletového popílku (20%, 30% a 40%) a s úletovým popínkem z různých elektráren s koncentrací 30%.

Všechny vzorky měly válcový tvar o průměru 120 mm a délku v rozmezí 41 – 45 mm. Horní plochy všech vzorků měly viditelné dutinky a jejich horní hrany byly olámané.



2.3 Metodika provedení experimentu

Vrtání geopolymerů bylo realizováno na otočné vrtačce typového označení VR4, která patří mezi strojní vybavení laboratoře KOM. Vrtání bylo uskutečněno přeastřenými šroubovitými vrtáky z RO s povlakem TiN o průměru 8mm. Vrták byl upnutý do tříčelistového sklíčidla a dále do Morse kuželu.

Ostření bylo provedeno na brusce s typovým označením N1, která také patří do vybavení laboratoře KOM.

Kritériem pro všechny experimenty bylo dosažení šířky opotřebení na hřbetu vrtáku $VB_{kr} = 0,5$ mm. Vrták byl upnutý do tříčelistového sklíčidla a dále do Morse kuželu.

Bylo otestováno 7 vzorků z geopolymérů. Tři vzorky s plnivem popílek K6 o koncentraci 20%, 30% a 40%. A pět vzorků plněných z 30% různými popílkami K1, K3, K6, PRT a OPE. Vzorek popílku K6 o koncentraci 30% byl shodný pro oba druhy experimentu. Obrobek byl vždy upnutý pomocí svěráku přímo na dynamometru, který snímá síly a krouticí momenty při procesu vrtání.

Všechny obrobené vzorky byly posuzovány jak z hlediska obrobku, kde se jednalo o drsnost povrchu R_a a R_z ve vyvrtaných dírách, tak i z hlediska nástroje, kde byla zkoumána šířka opotřebení na hřbetu vrtáku VB , velikosti posuvových sil F_f , řezných sil F_c a krouticích momentů M_k .

Měření šířky opotřebení na hřbetu vrtáku VB bylo realizováno pomocí nástrojové lupy Brinell přímo na pracovišti. A snímky šířky opotřebení na hřbetu vrtáku byly pořízeny v laboratoři KOM na mikroskopu Arsenal SZP 3112 – T s kamerou Labo 3MP. Tyto snímky byly zaznamenány pomocí programu MINISEE.

Síly a krouticí momenty působící během procesu vrtání byly snímány dynamometrem s tenzometrickými snímači pomocí měřicí soustavy TDA – 3 a poté byly vyhodnoceny programem INMES.

Drsnost povrchu v dírách byla měřena laboratorním profiloměrem Mitutoyo SV – 2000 N2 a tyto hodnoty byly vyhodnoceny programem SURFPARK.

Pro zhodnocení opakování byly použity statistické výpočty. A to výpočet konfidenčního intervalu (statistický interval spolehlivosti), který udává, že další výsledky měření experimentu budou s předpokládanou pravděpodobností umístěny v tomto intervalu.



- Střední hodnota

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

- normalizovaná odchylka

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{(n-1)}}$$

- statistický interval spolehlivosti

$$x_{max} = \bar{x} + \frac{q \cdot s}{\sqrt{n-1}}$$

$$x_{min} = \bar{x} - \frac{q \cdot s}{\sqrt{n-1}}$$

kde: x_j ... j-tá hodnota statistického souboru

n ... celkový počet hodnot

q ... konstanta pro úroveň spolehlivosti 95%, 99% a 99.9 %

Všechna měření byla realizována v laboratořích KOM zcela v souladu s požadavkem na bezpečnost práce. Grafické závislosti všech naměřených a odečtených hodnot z laboratoří KOM byly zpracovány pomocí programu Microsoft Office Excel 2007.



Stroj	Otočná radiální vrtačka VR4
Obráběný materiál	1.) GP s plnivem 30% popílku K1, K3, K6, PRT a OPE 2.) GP s obsahem popílku K6 20%, 30% a 40%
Nástroj	šroubovitý vrták ØD = 8 mm RO - TiN, PN 2931 - DIN 338 RN
Řezné prostředí	bez procesní kapaliny, pouze okolní vzduch
Název experimentu	Opotřebení nástroje za konstantních řezných podmínek
Řezné podmínky	řezná rychlost: $v_c = 6,28 \text{ m/min}$ ($n = 250 \text{ min}^{-1}$) posuv na otáčku: $f = 0,16 \text{ mm/ot}$
Způsob vrtání	do plného materiálu
Měřicí přístroje	nástrojová lupa Brinell, dynamometr s tenzometrickými snímači
Opakování měření	4
Měřené veličiny	posuvová síla F_f [N] krouticí moment M_k [Nm] šířka opotřebení na hřbetu VB [mm] průměrná aritmetická úchylna profilu Ra [μm] největší výška profilu Rz [μm]

Tabulka 1: Metodika experimentu při obrábění vrtáním

2.3.1 Postup při realizaci experimentu

Před každým začátkem měření experimentu byla vždy provedena příprava pracoviště stroje, která zahrnovala přípravu vzorků, nástrojů a hlavně kalibraci soupravy pro měření sil a krouticích momentů.

Dále byly na vrtačce nastaveny řezné podmínky a to řezná rychlost nástroje, posuv vřetena stroje a koncový doraz pro požadovanou délku vrtané díry. Ovládací páky a kola pro nastavení těchto podmínek se nacházejí na vřeteníku stroje. Poté byl obrobek upnut na pracovní stůl a nástroj do vřetena stroje. Po těchto přípravách a spuštění stroje probíhalo vlastní měření.

2.3.2 Způsob měření a provedení experimentu

V průběhu obrábění byly měřeny síly a krouticí momenty pomocí tenzometrického dynamometru a TDA – 3. Tyto naměřené hodnoty byly vyhodnoceny osobním počítačem v programu INMES. Přímo na pracovišti stroje, po vyvrtání určité délky otvoru, bylo prováděno měření opotřebení břitů vrtáku. Po dokončení daných



pokusů na stroji byla měřena drsnost obrobeného povrchu v pěti místech otvoru.

Tento experiment byl rozdělen na dvě části. V první části byla zjišťována trvanlivost nástroje, řezné síly a parametry drsnosti povrchu při vrtání geopolymerů s 30% obsahem různých druhů úletového popílku (K1, K3, K6, PRT a OPE). A ve druhé části se jednalo o zjišťování trvanlivosti nástroje, řezné síly a parametry drsnosti povrchu při vrtání geopolymerů s různým obsahem (20%, 30% a 40%) úletového popílku K6.

2.4 Analýza naměřených hodnot

Tato kapitola je věnována vyhodnocení naměřených, odečtených a dopočítaných hodnot, získaných dle metodiky experimentu, popsané v kapitole 2.3. Všechny odečtené, naměřené a dopočítané hodnoty byly graficky zpracovány v programu Microsoft Office Excel 2007. Tabulky naměřených hodnot jsou uvedeny v příloze 3 této bakalářské práce.

2.4.1 Vliv druhu úletového popílku v GP na trvanlivost nástroje při vrtání

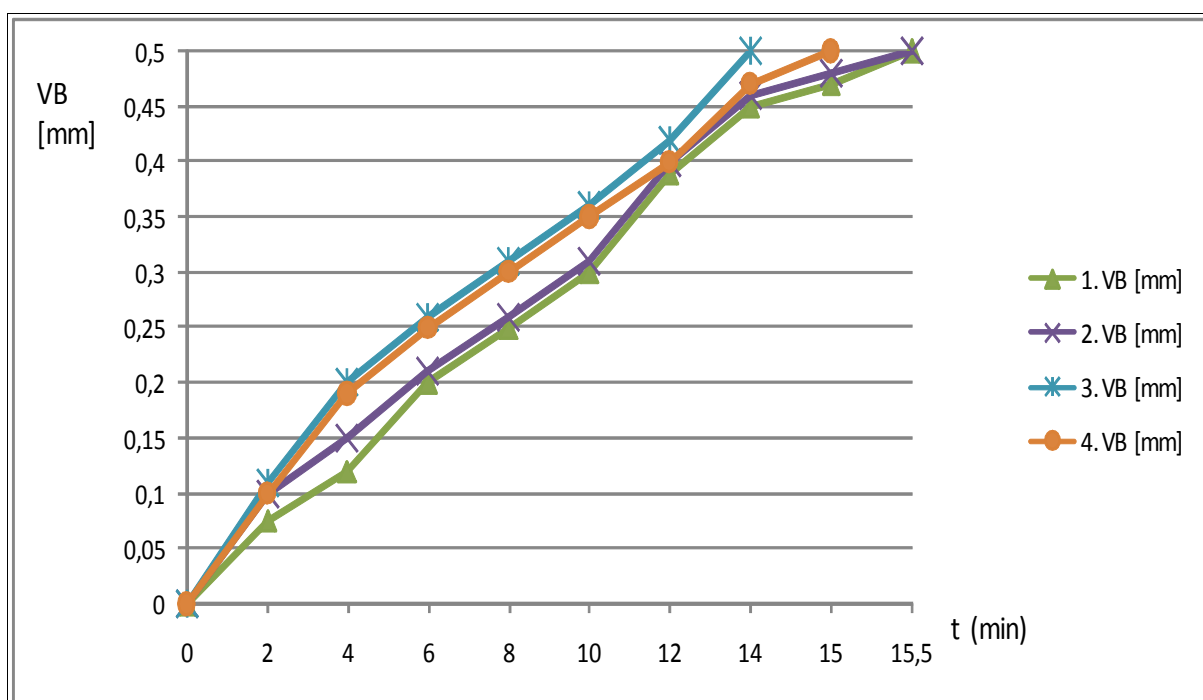
Po vyvrtání díry určité hloubky bylo vždy měřeno opotřebení na hřbetu ostří vrtáku pomocí nástrojové lupy Brinell a tyto hodnoty byly zaznamenávány do tabulek a následně vyhodnoceny. Tyto tabulky jsou součástí přílohy. Zpracované hodnoty opotřebení hřbetu nástroje při vrtání geopolymeru naplněného 30% úletového popílku K3 (vzorek GP_30%K3), jsou na ukázkou znázorněné v tabulce 2.

h [mm]	t [min]	1. VB [mm]	2. VB [mm]	3. VB [mm]	4. VB [mm]
0	0	0	0	0	0
80	2	0,075	0,1	0,11	0,1
160	4	0,12	0,15	0,2	0,19
240	6	0,2	0,21	0,26	0,25
320	8	0,25	0,26	0,31	0,3
400	10	0,3	0,31	0,36	0,35
480	12	0,39	0,4	0,42	0,4
560	14	0,45	0,46	0,5	0,47
600	15	0,47	0,48		0,5
620	15,5	0,5	0,5		

Tabulka 2: Tabulkové zpracování hodnot opotřebení nástroje při vrtání GP_30%K3



Pro větší přehlednost byly tyto tabulkové hodnoty zpracovány do grafů, které jsou také součástí příloh. Na ukázkou jsou v grafu 1 níže znázorněny tyto zpracované hodnoty opotřebení hřbetu nástroje při vrtání geopolymery naplněného 30% úletového popílku K3 (vzorek GP_30%K3).



➤ Graf 1: Grafické zpracování hodnot opotřebení nástroje při vrtání GP_30%K3

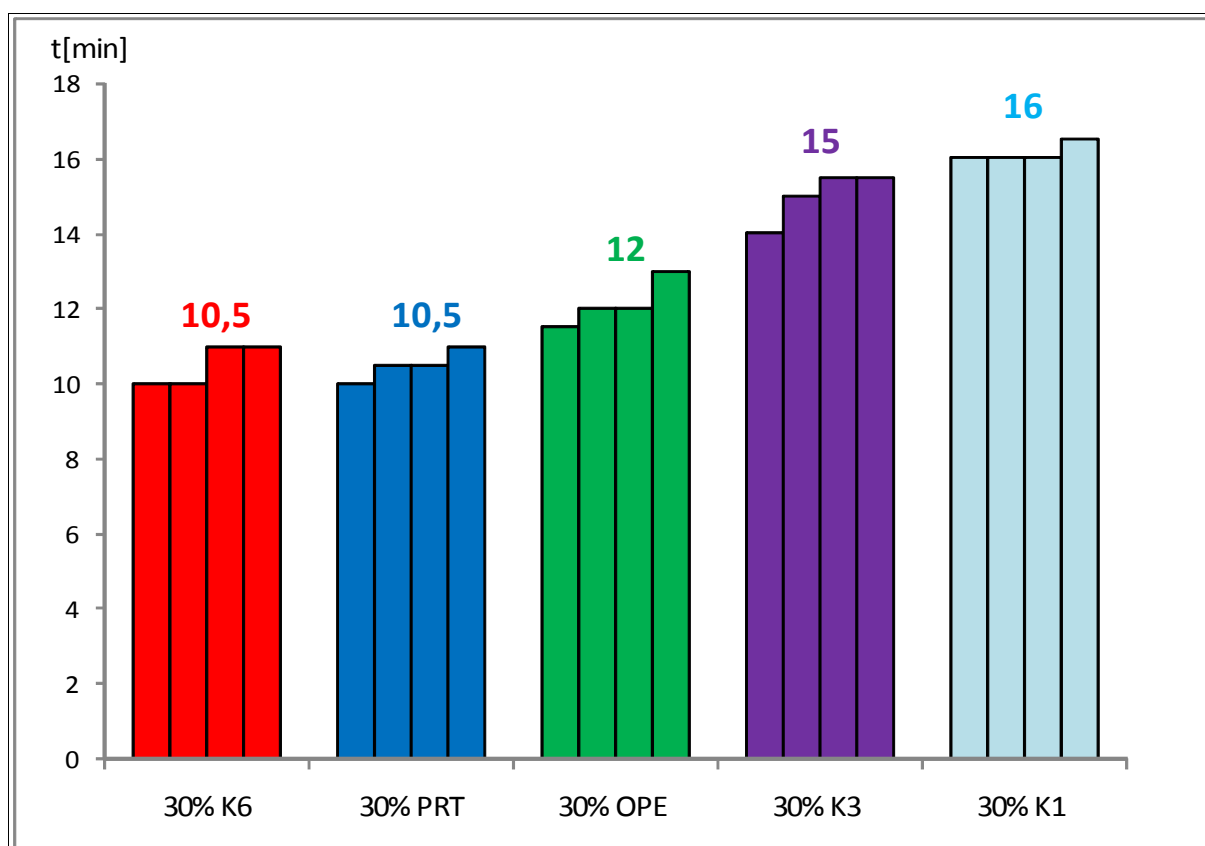
Z takto zpracovaných dat pro všechny zkoumané druhy úletových popílků byla vytvořena tabulka a graf znázorňující vliv druhu popílku v geopolymery na trvanlivost nástroje při vrtání.

	30% K6	30% PRT	30% OPE	30% K3	30% K1
T ₁	10	10	11,5	14	16
T ₂	10	10,5	12	15	16
T ₃	11	10,5	12	15,5	16
T ₄	11	11	13	15,5	16,5
x _T	10,5	10,5	12	15	16

Tabulka 3: Tabulka trvanlivostí nástroje při vrtání GP s různými druhy popílku



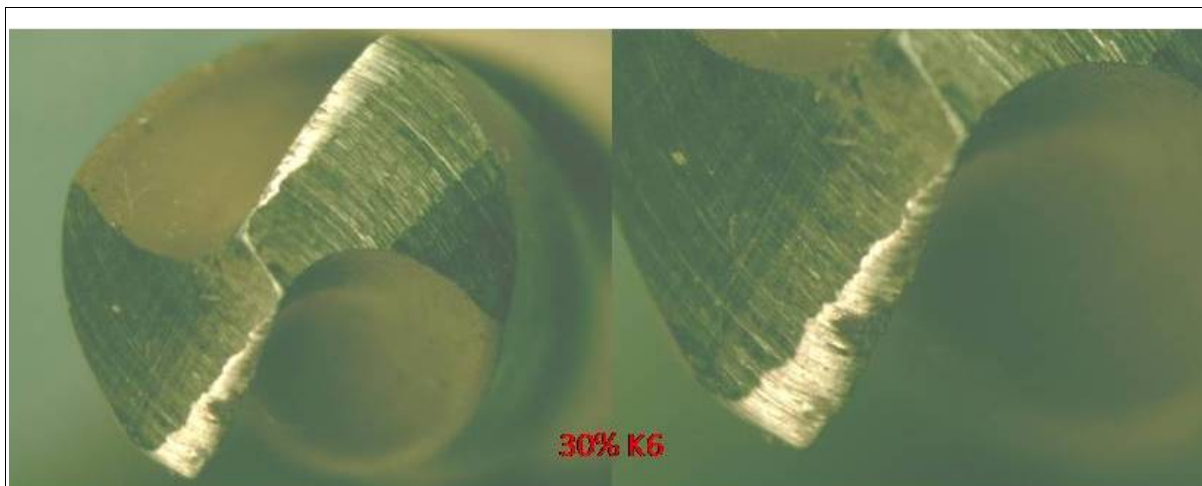
Pro všechny zkoumané druhy úletových popílků jsou hodnoty trvanlivostí nástroje, ze čtyř zkoušek podle metodiky provedení experimentu v kapitole 2.3, uvedeny v tabulce 3. Zpřehledněním této tabulky je níže uvedený graf 2, který znázorňuje vliv druhu popílku v geopolymery na trvanlivost nástroje při vrtání.



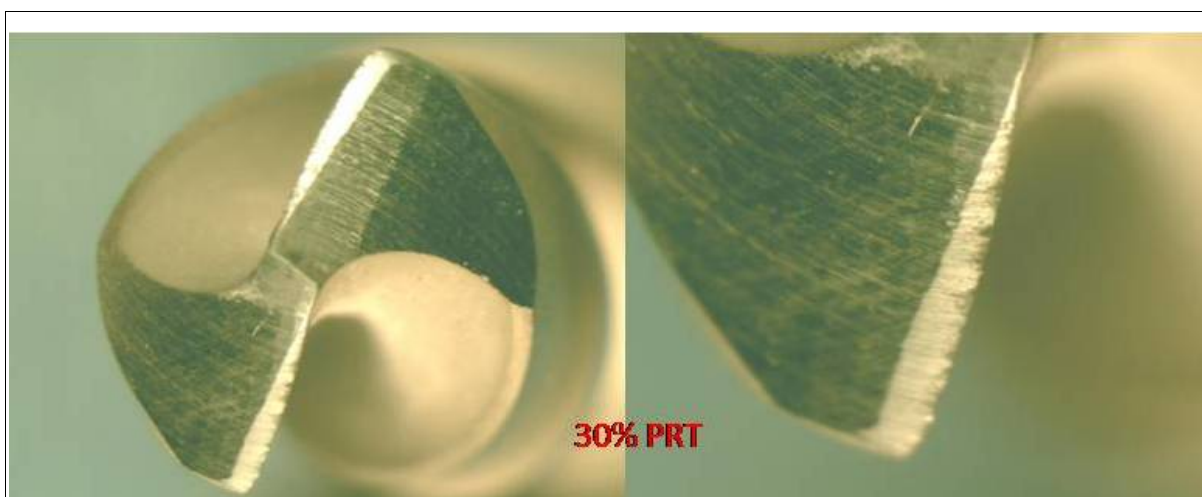
➤ Graf 2: Vliv druhu popílku v geopolymery na trvanlivost nástroje při vrtání

Z grafu 2 vyplývá, že nejdelší trvanlivost nástroje byla při vrtání GP plněného z 30% popílkem K1 a to je o 34% delší trvanlivost než při vrtání GP plněného z 30% popílkem K6 i PRT a o 25% delší trvanlivost než při vrtání GP plněného z 30% popílkem OPE.

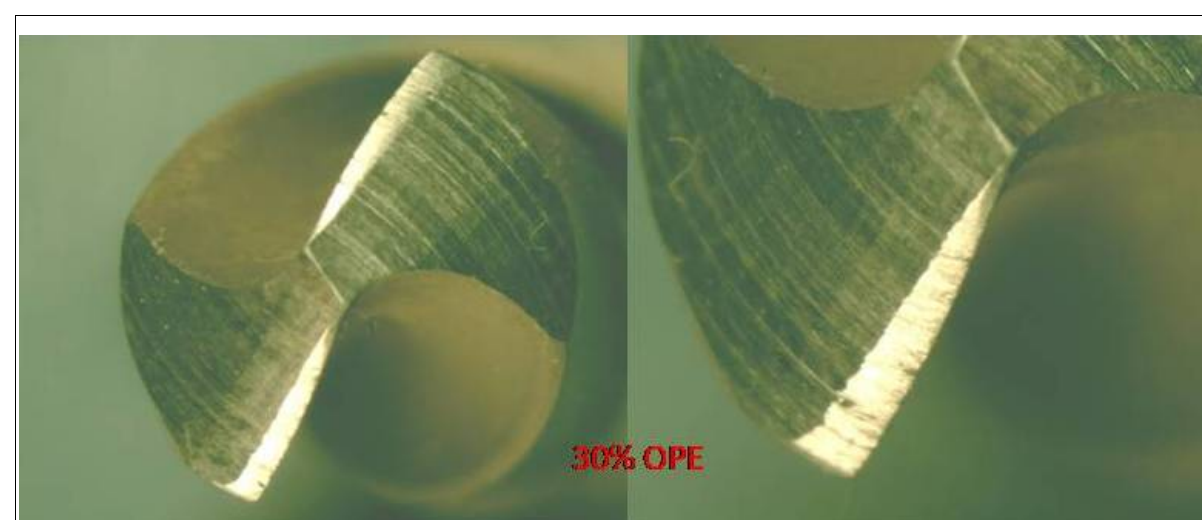
Pro názorné ukázání opotřebení na hřbetu vrtáku, při dosažení kritéria opotřebení nástroje $VB = 0,5 \text{ mm}$, jsou níže uvedeny fotografie z mikroskopu Arsenal SZP 3112-T s kamerou LABO 3MP.



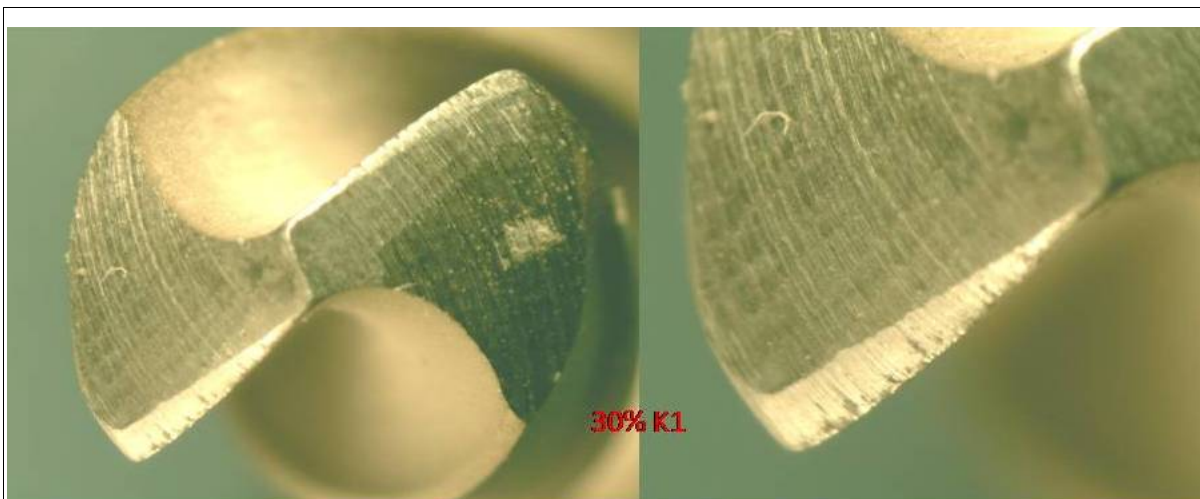
Obr. 35: Opotřebení hřbetu vrtáku po vrtání GP s obsahem popílku K6 30%



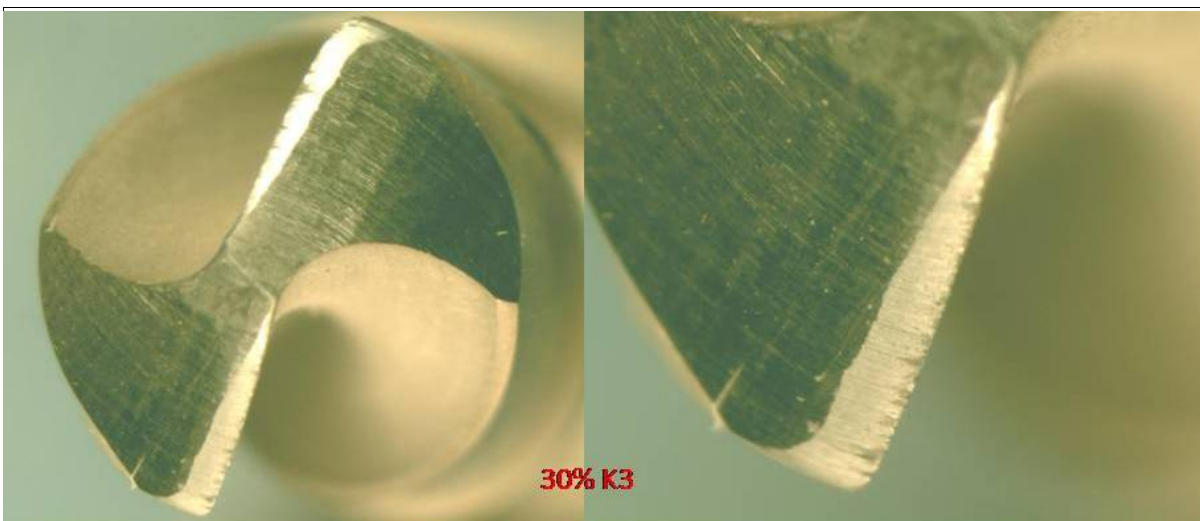
Obr. 36: Opotřebení hřbetu vrtáku po vrtání GP s obsahem popílku PRT 30%



Obr. 37: Opotřebení hřbetu vrtáku po vrtání GP s obsahem popílku OPE 30%



Obr. 38: Opotřebení hřbetu vrtáku po vrtání GP s obsahem popílku K1 30%



Obr. 39: Opotřebení hřbetu vrtáku po vrtání GP s obsahem popílku K3 30%

2.4.2 Vliv obsahu úletového popílku v GP na trvanlivost nástroje při vrtání

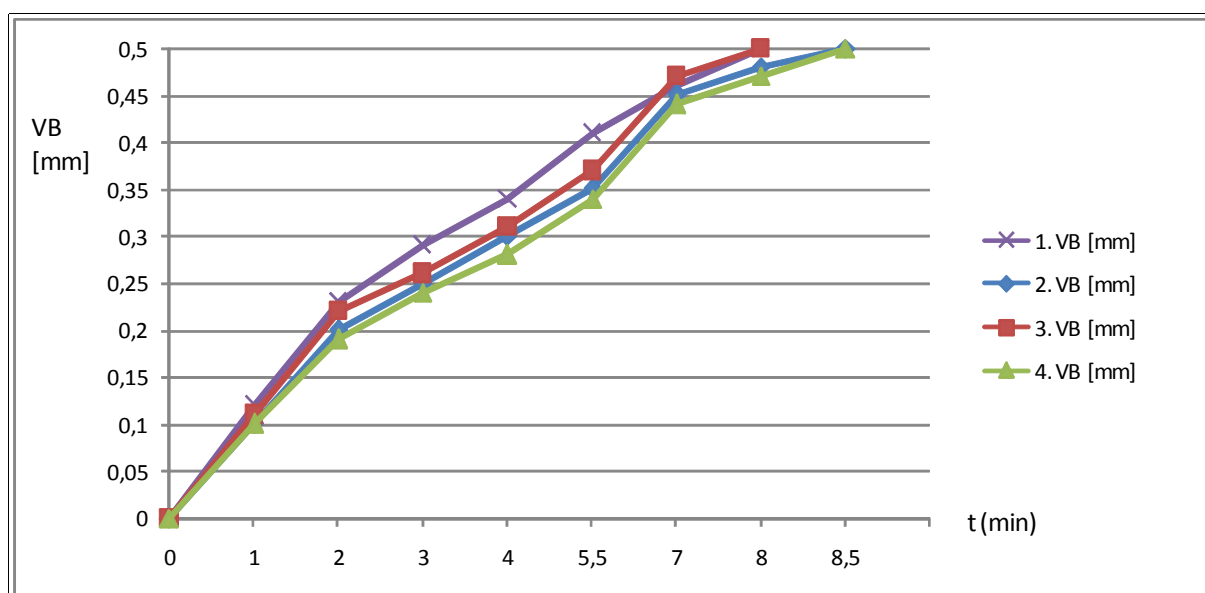
Po vyvrtání díry určité hloubky, bylo vždy měřeno opotřebení na hřbetu ostří vrtáku, pomocí nástrojové lupy Brinell a tyto hodnoty byly zaznamenávány do tabulek a následně vyhodnoceny. Tyto tabulky jsou součástí přílohy. Zpracované hodnoty opotřebení hřbetu nástroje při vrtání geopolymeru naplněného 20% úletového popílku K6 (vzorek GP_20%K6), jsou znázorněné na ukázkou v tabulce 4.



h [mm]	t [min]	1. VB [mm]	2. VB [mm]	3. VB [mm]	4. VB [mm]
0	0	0	0	0	0
40	1	0,12	0,1	0,11	0,1
80	2	0,23	0,2	0,22	0,19
120	3	0,29	0,25	0,26	0,24
160	4	0,34	0,3	0,31	0,28
220	5,5	0,41	0,35	0,37	0,34
280	7	0,46	0,45	0,47	0,44
320	8	0,5	0,48	0,5	0,47
340	8,5		0,5		0,5

Tabulka 4: Tabulkové zpracování hodnot opotřebení nástroje při vrtání GP_20%K6

Pro větší přehlednost byly tyto tabulkové hodnoty zpracovány do grafů, které jsou také součástí příloh. Na ukázkou jsou v grafu 3 níže znázorněny tyto zpracované hodnoty opotřebení hřbetu nástroje při vrtání geopolymery naplněného 20% úletového popílku K6 (vzorek GP_20%K6).



➤ Graf 3: Grafické zpracování hodnot opotřebení nástroje při vrtání GP_20%K6

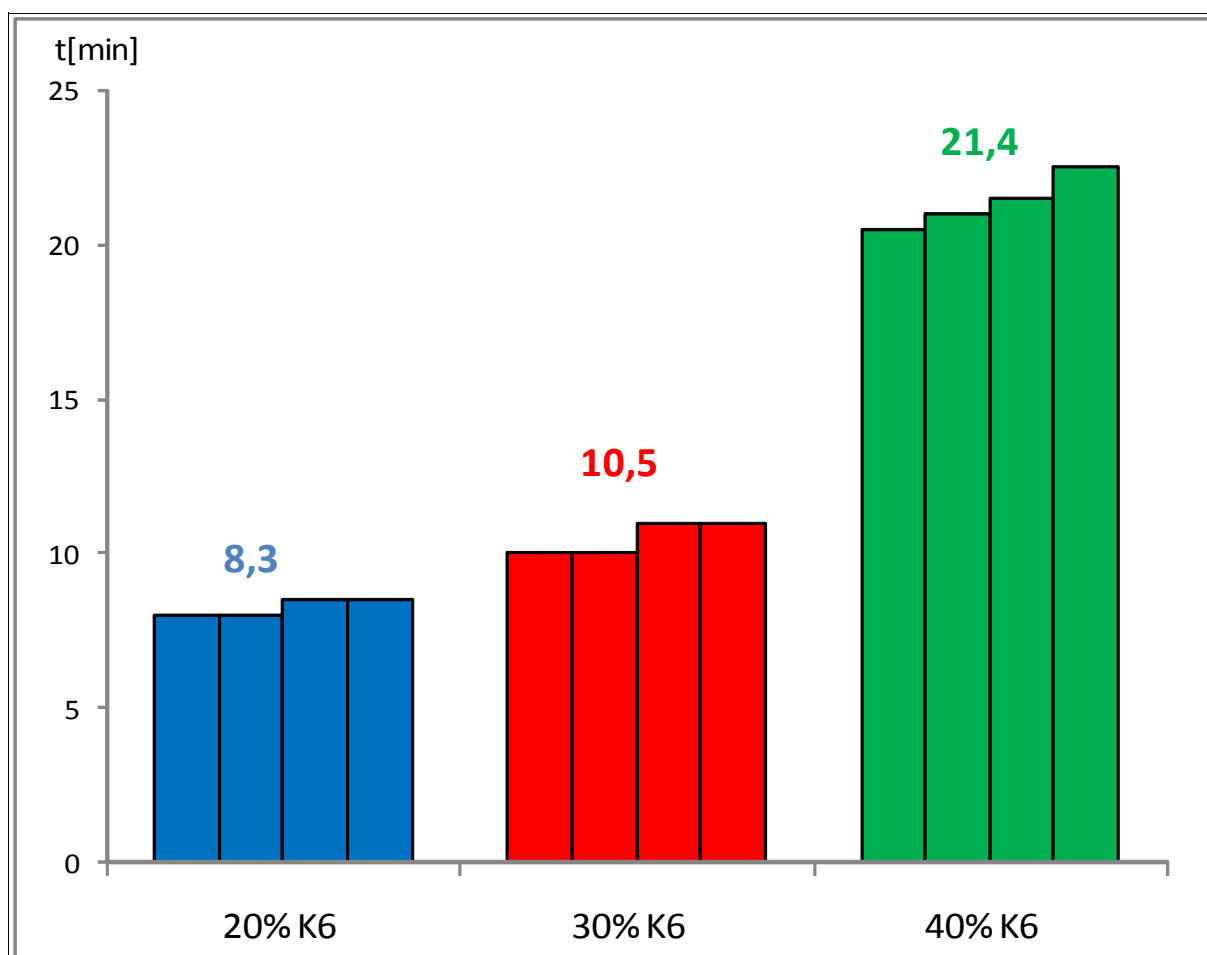
Z takto zpracovaných dat pro zkoumané obsahy úletových popílků v geopolymery byla vytvořena tabulka a graf znázorňující vliv obsahu úletového popílku K6 v geopolymery na trvanlivost nástroje při vrtání.



	20% K6	30% K6	40% K6
T_1	8	10	20,5
T_2	8	10	21
T_3	8,5	11	21,5
T_4	8,5	11	22,5
x_T	8,25	10,5	21,375

Tabulka 5: Tabulka trvanlivostí nástroje při vrtání GP s různým obsahem popílku K6

Pro zkoumané obsahy úletového popílku K6 jsou hodnoty trvanlivostí nástroje, ze čtyř zkoušek podle metodiky provedení experimentu v kapitole 2.3, uvedeny v tabulce 5. Zpřehledněním této tabulky je níže uvedený graf 4, který znázorňuje vliv obsahu popílku K6 v geopolymery na trvanlivost nástroje při vrtání.

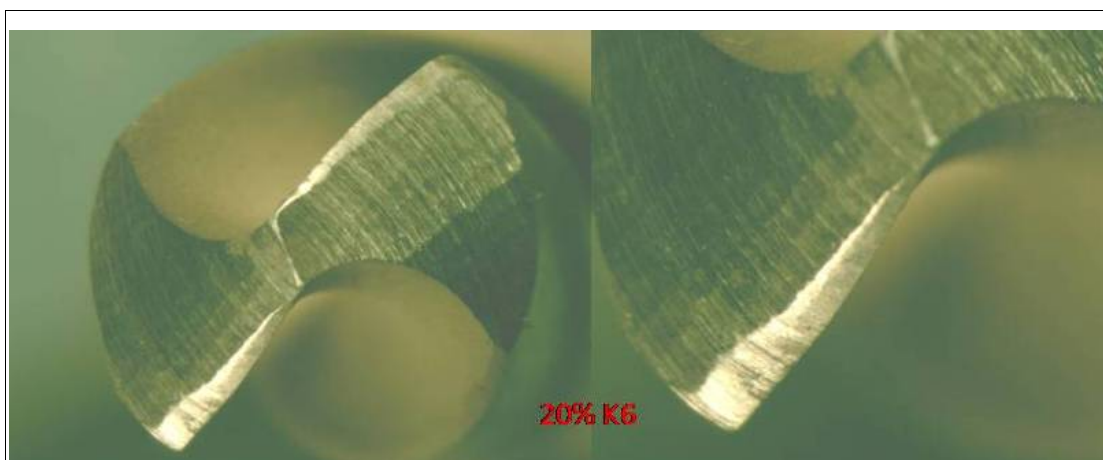


➤ Graf 4: Vliv obsahu popílku K6 v geopolymery na trvanlivost nástroje při vrtání

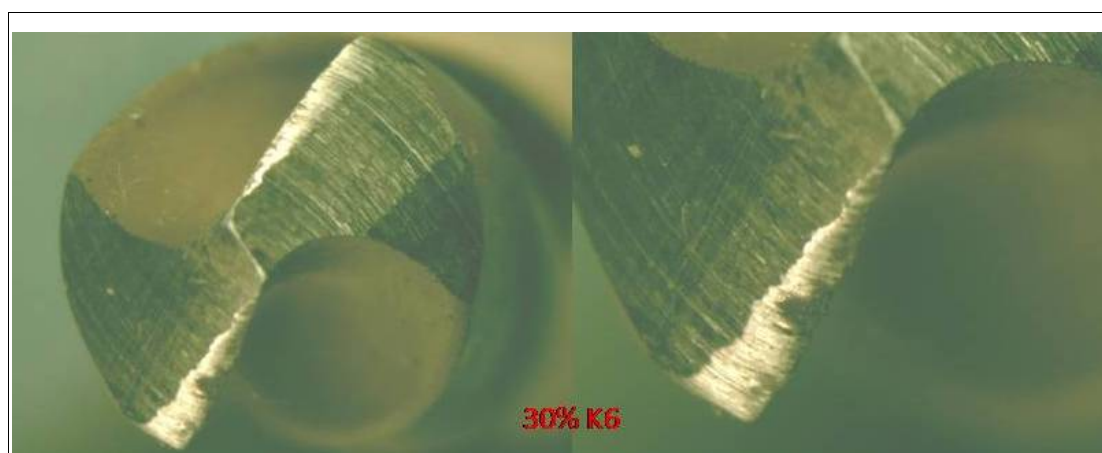


Z grafu 4 vyplývá, že čím byl větší obsah plniva popílku K6 v geopolyméru, tím větší byla i trvanlivost nástroje při vrtání. Při vrtání geopolyméru s obsahem popílku K6 40% byla naměřena trvanlivost nástroje $T = 21,4$ minuty, což je o 61% delší trvanlivost nástroje než při vrtání GP s 20% popílku K6 a o 51% delší trvanlivost nástroje než při vrtání GP s 30% popílku K6.

Pro názorné ukázání opotřebení na hřbetu vrtáku, při dosažení kritéria opotřebení nástroje $VB = 0,5$ mm, jsou níže uvedeny fotografie z mikroskopu Arsenal SZP 3112-T s kamerou LABO 3MP.



Obr. 40: Opotřebení hřbetu vrtáku po vrtání GP s obsahem popílku K6 20%



Obr. 41: Opotřebení hřbetu vrtáku po vrtání GP s obsahem popílku K6 30%



Obr. 42: Opatřebení hřbetu vrtáku po vrtání GP s obsahem popílku K6 40%

2.4.3 Vliv druhu úletového popílku v GP na velikost řezných sil a krouticího momentu při vrtání

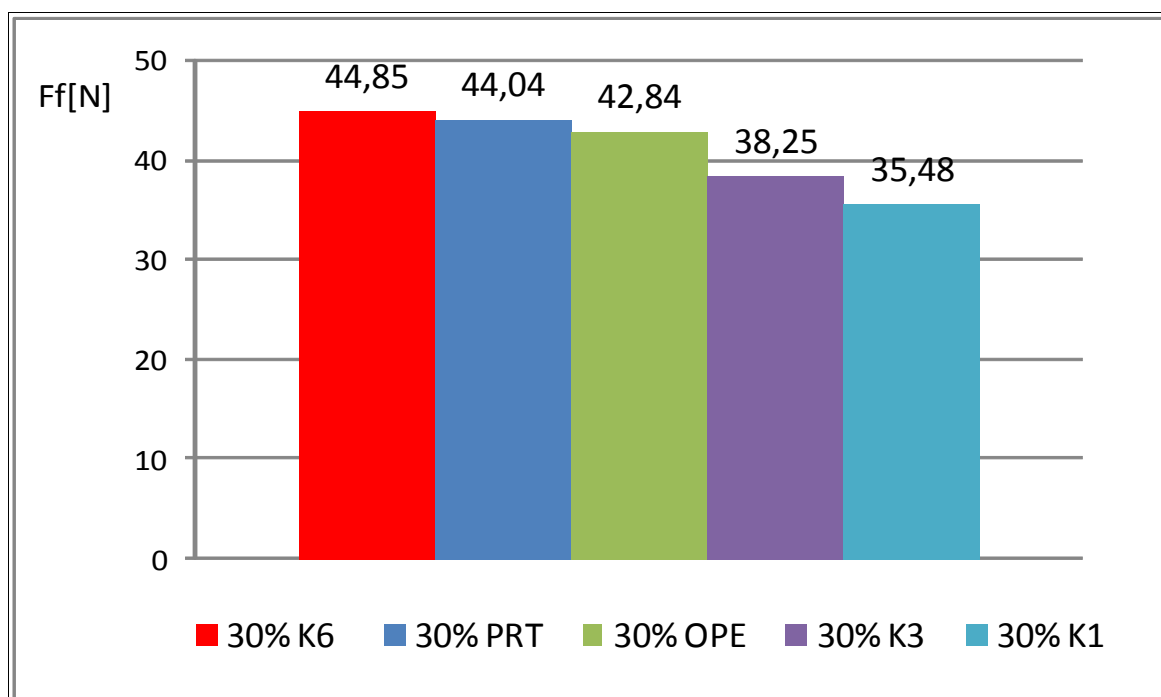
Řezná síla F_c , posuvová síla F_f a krouticí moment M_k byly hodnoceny u geopolymerů s různým druhem plniva o koncentraci 30%. Jako plnivo byly použity elektrárenské popílky s označením OPE, PRT, K1, K3 a K6. U těchto druhů popílku byl zkoumán jejich vliv na velikost řezné síly F_c , posuvové síly F_f a krouticího momentu M_k . Měření probíhalo za konstantních řezných podmínek ($v_c = 6,28$ m/min, $f = 0,16$ mm/ot) (viz. Metodika v kapitole 2.3) a na každém vzorku bylo provedeno pět opakování měření. Tyto naměřené hodnoty jsou uvedené v níže vložených tabulkách 6, 7 a 8.

	30% K6 F_f [N]	30% PRT F_f [N]	30% OPE F_f [N]	30% K3 F_f [N]	30% K1 F_f [N]
1	43,542	42,751	41,151	36,935	33,851
2	44,012	43,432	42,614	38,031	34,093
3	44,371	43,938	42,921	38,427	35,142
4	46,097	44,364	43,357	37,855	36,861
5	46,213	45,691	44,163	40,003	37,442
\bar{x}_i	44,847	44,035	42,841	38,25	35,48

Tabulka 6: Zpracování hodnot posuvové síly F_f při vrtání GP s různým druhem popílku



Pro větší přehlednost byly průměrné hodnoty posuvové síly F_f z tabulky 6 zpracovány do grafu 5.



➤ *Graf 5: Grafické znázornění průměrných hodnot posuvové síly F_f při vrtání GP s různým druhem popílku*

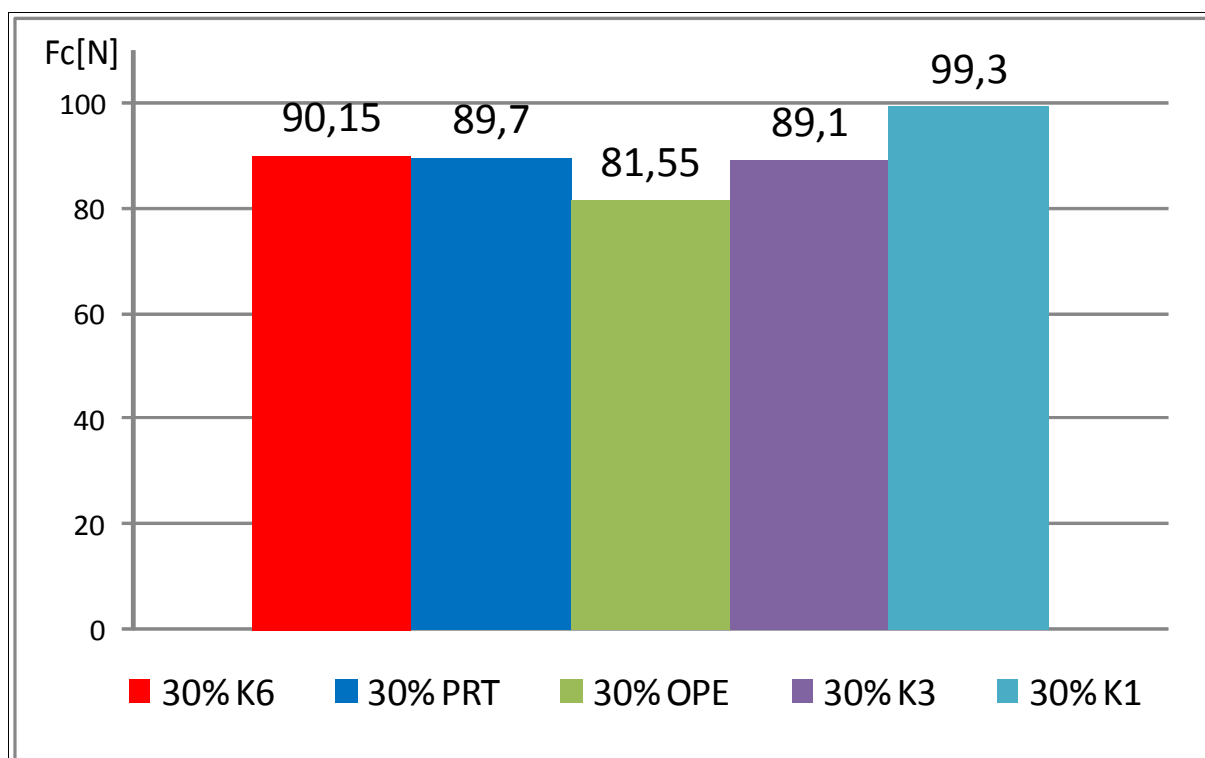
Při porovnání průměrných hodnot posuvových sil F_f u těchto vzorků GP byla naměřena největší posuvová síla při vrtání vzorku GP s plnivem 30% K6 a nejmenší posuvová síla byla naměřena při vrtání vzorku GP s plnivem 30% K1. Rozdíl mezi největší a nejmenší naměřenou řeznou silou je 20,5%. Druhá nejmenší posuvová síla byla naměřena u vzorku GP plněného z 30% popílku K3 a to o 14,5% menší než u vzorku GP 30%K6. U ostatních druhů popílku v GP nebyl rozdíl větší než 5%, oproti nejvyšší naměřené posuvové síle při vrtání GP s popílku 30%K1.



	30% K6 F_c [N]	30% PRT F_c [N]	30% OPE F_c [N]	30% K3 F_c [N]	30% K1 F_c [N]
1	78,5	80,75	78	79,75	85,5
2	87,25	88	80,25	84,75	94,5
3	92,75	91	82	92	98,5
4	93,5	92	83	93,75	108,25
5	98,75	96,75	84,5	95,25	109,75
\bar{x}_i	90,15	89,7	81,55	89,1	99,3

Tabulka 7: Zpracování hodnot řezné síly F_c při vrtání GP s různým druhem popílku

V grafu 6 jsou z tabulky 7 znázorněné průměrné hodnoty řezné síly F_c při obrábění geopolymerů plněných ze 30% různými druhy úletových popílků.



➤ Graf 6: Grafické znázornění průměrných hodnot řezné síly F_c při vrtání GP s různým druhem popílku

Při porovnání průměrných hodnot řezných sil F_c u těchto vzorků GP byla naměřena největší řezná síla při vrtání vzorku GP s plnivem 30% K1 a nejmenší řezná síla byla naměřena při vrtání vzorku GP s plnivem 30% OPE. Rozdíl mezi naměřenou největší a nejmenší řeznou silou je 17,5%. U ostatních druhů popílku

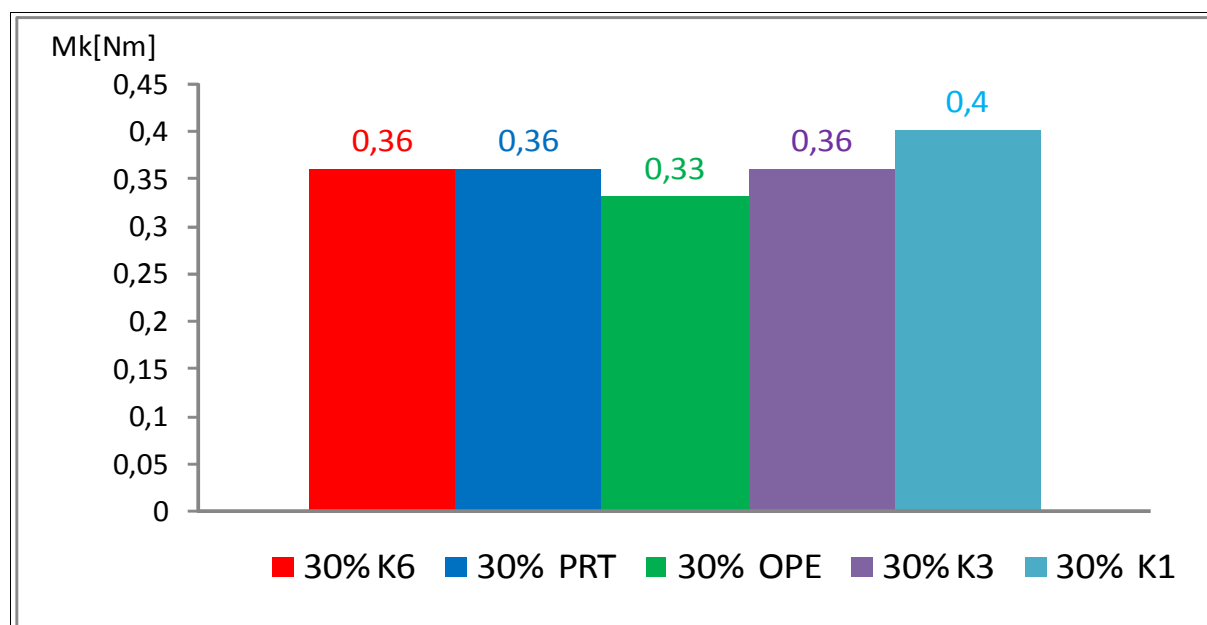


(K3, K6, PRT) v GP byl rozdíl oproti nejvyšší naměřené řezné síle při vrtání GP s popílkem 30% K1 v rozmezí 9 až 10 %.

	30% K6 M_k [Nm]	30% PRT M_k [Nm]	30% OPE M_k [Nm]	30% K3 M_k [Nm]	30% K1 M_k [Nm]
1	0,314	0,323	0,312	0,319	0,342
2	0,349	0,352	0,321	0,339	0,378
3	0,371	0,364	0,328	0,368	0,394
4	0,374	0,368	0,332	0,375	0,433
5	0,395	0,387	0,338	0,381	0,439
\bar{x}_i	0,36	0,36	0,33	0,36	0,4

Tabulka 8: Zpracování hodnot krouticího momentu M_k při vrtání GP s různým druhem popílku

Pro větší přehlednost byly průměrné hodnoty krouticího momentu z tabulky 8 zpracovány do grafu 7.



➤ Graf 7: Grafické znázornění průměrných hodnot krouticích momentů M_k při vrtání GP s různým druhem popílku

Při porovnání průměrných hodnot krouticích momentů M_k u těchto vzorků GP byl naměřen největší krouticí moment při vrtání vzorku GP s plnivem 30% K1



a nejmenší krouticí moment byl naměřen při vrtání vzorku GP s plnivem 30% OPE. Rozdíl mezi největším a nejmenším naměřeným krouticím momentem je 17,5%. U ostatních druhů popílku (K3, K6, PRT) v GP byl rozdíl krouticího momentu 10% oproti nejvyššímu naměřenému krouticímu momentu při vrtání GP s popílkem 30%K1.

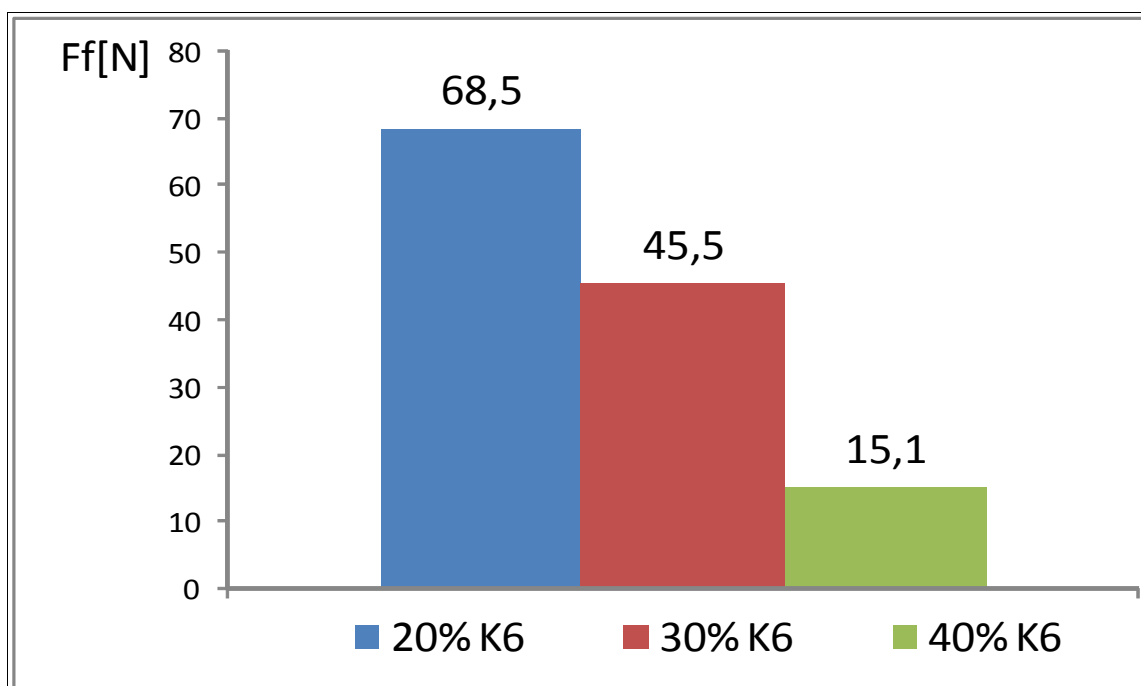
2.4.4 Vliv obsahu úletového popílku v GP na velikost řezných sil a krouticího momentu při vrtání

Řezná síla F_c , posuvová síla F_f a krouticí moment M_k byly hodnoceny u geopolymerů s různým obsahem plniva popílku K6. Pro měření byly použité koncentrace 20%, 30% a 40%. U těchto obsahů popílku byl zkoumán jejich vliv na velikost řezné síly F_c , posuvové síly F_f a krouticího momentu M_k . Měření probíhalo za konstantních řezných podmínek ($v_c = 6,28$ m/min, $f = 0,16$ mm/ot) a na každém vzorku bylo provedeno pět opakování měření. Tyto naměřené hodnoty jsou uvedené v níže vložených tabulkách 6, 7 a 8.

	20% K6 F_f [N]	30% K6 F_f [N]	40% K6 F_f [N]
1	66,787	43,542	12,912
2	67,924	44,736	14,587
3	68,684	45,761	15,142
4	68,791	46,199	15,932
5	70,125	47,213	17,063
\bar{x}_i	68,5	45,5	15,1

Tabulka 9: Zpracování hodnot posuvové síly F_f při vrtání GP s různým obsahem popílku

Pro větší přehlednost byly průměrné hodnoty posuvové síly F_f z tabulky 6 zpracovány do grafu 5.



➤ *Graf 8: Grafické znázornění průměrných hodnot posuvové síly F_f při vrtání GP s různým obsahem popílku*

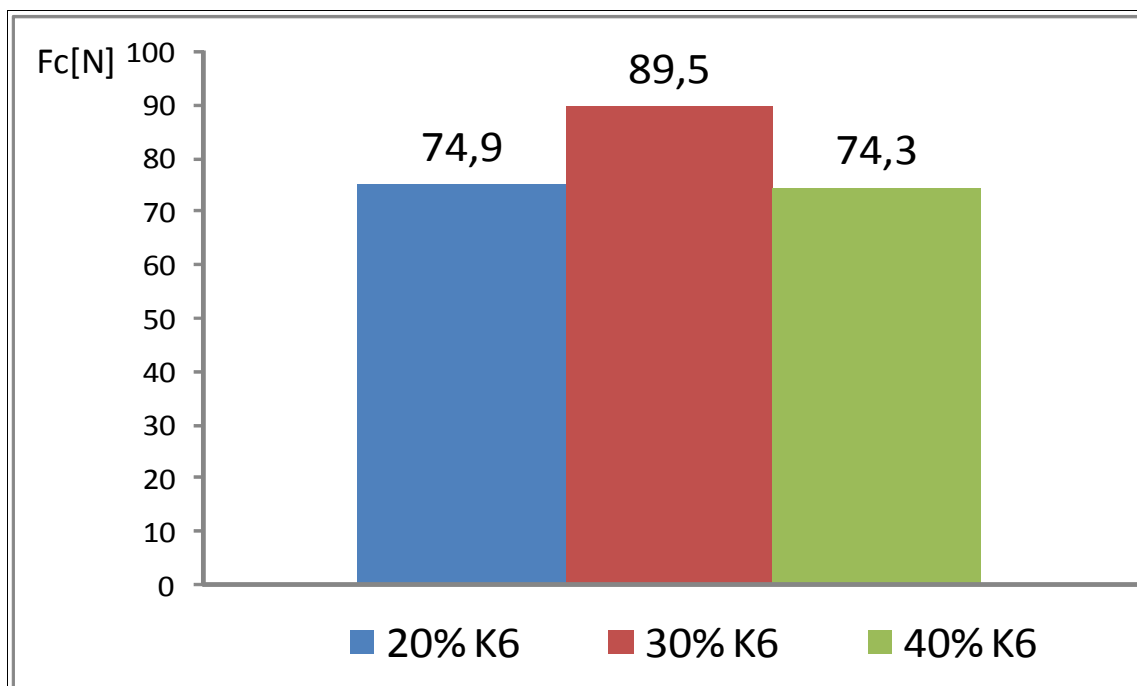
Při porovnání průměrných hodnot posuvových sil F_f u těchto vzorků GP byla naměřena největší posuvová síla při vrtání vzorku GP s obsahem plniva 20% K6 a nejmenší posuvová síla byla naměřena při vrtání vzorku GP s obsahem plniva 40% K6. Rozdíl mezi největší a nejmenší naměřenou řeznou silou je 78%. U vzorku GP plněného z 30% popílkem K6 byla změřena posuvová síla o 33,5% menší než u vzorku GP 20%K6.

	20% K6 F_c [N]	30% K6 F_c [N]	40% K6 F_c [N]
1	69	78,5	67
2	72,75	87	72,25
3	76,25	89,75	73,5
4	77	93,5	76,5
5	79,5	98,75	82
x_i	74,9	89,5	74,3

Tabulka 10: Zpracování hodnot řezné síly F_c při vrtání GP s různým obsahem popílku



V grafu 9 jsou z tabulky 10 znázorněné průměrné hodnoty řezné síly F_c při obrábění geopolymérů plněných různým obsahem úletových popílků.



➤ Graf 9: Grafické znázornění průměrných hodnot řezné síly F_c při vrtání GP s různým obsahem popílku

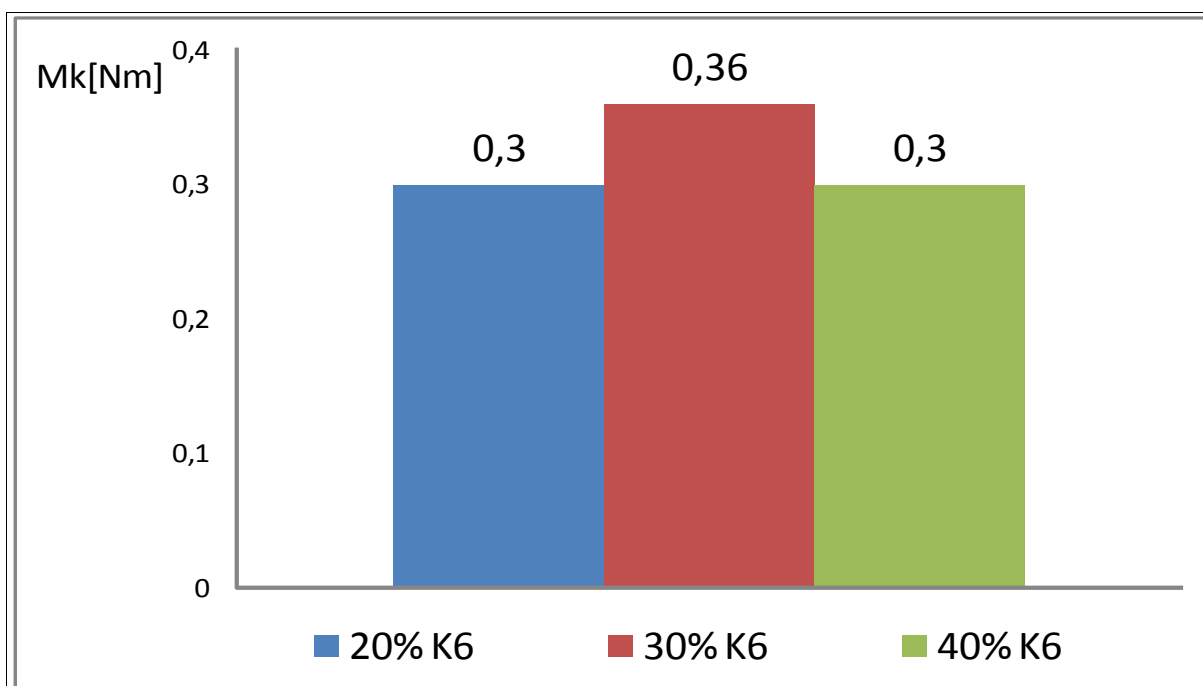
Při porovnání průměrných hodnot řezných sil F_c u těchto vzorků GP byla naměřena největší řezná síla při vrtání vzorku GP s obsahem plniva 30% K6 a nejmenší řezná síla byla naměřena při vrtání vzorku GP s obsahem plniva 40% K6. Rozdíl mezi naměřenou největší a nejmenší řeznou silou je 17%. Při vrtání GP s 20% obsahem popílku K6 byl rozdíl oproti nejvyšší naměřené řezné síle při vrtání GP 30% K6 menší o 16,3%.

	20% K6 M_k [Nm]	30% K6 M_k [Nm]	40% K6 M_k [Nm]
1	0,276	0,314	0,268
2	0,291	0,348	0,289
3	0,305	0,359	0,294
4	0,308	0,374	0,306
5	0,318	0,395	0,328
\bar{x}_i	0,3	0,36	0,3

Tabulka 11: Zpracování hodnot krouticího momentu M_k při vrtání GP s různým obsahem popílku



Pro větší přehlednost byly průměrné hodnoty krouticího momentu z tabulky 11 zpracovány do grafu 10.



➤ *Graf 10: Grafické znázornění průměrných hodnot krouticích momentů M_k při vrtání GP s různým obsahem popílku*

Při porovnání průměrných hodnot krouticích momentů M_k u těchto vzorků GP, byl naměřen největší krouticí moment při vrtání vzorku GP s obsahem plniva 30% K6 a nejmenší krouticí moment byl naměřen při vrtání vzorků GP s obsahy plniva 40% a 20% K6. Rozdíl mezi největším a nejmenším naměřeným krouticím momentem je 16,6%.

2.4.5 Vliv druhu úletového popílku v GP na drsnost povrchu v dírách po vrtání

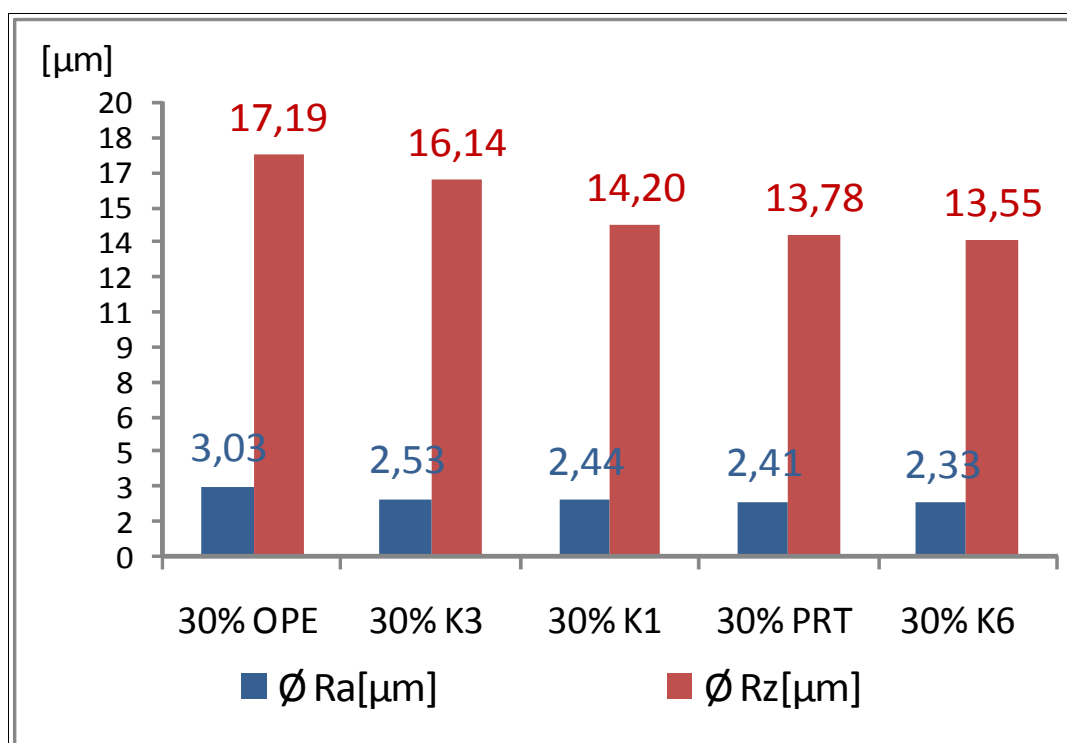
Hodnoty drsnosti povrchu v dírách po vrtání geopolymerů plněných z 30% různým druhem popílku byly měřeny na pěti místech uvnitř prvního otvoru daného pokusu. V tabulce 12 jsou uvedené průměrné hodnoty drsností povrchu R_a (střední aritmetická úchylka profilu) a R_z (výška nerovnosti profilu) při vrtání GP s 30% obsahem různých druhů úletových popílků.



	Ø Ra[μm]	Ø Rz[μm]
30% OPE	3,03	17,19
30% K3	2,53	16,14
30% K1	2,44	14,20
30% PRT	2,41	13,78
30% K6	2,33	13,55

Tabulka 12: Průměrné hodnoty drsnosti povrchu Ra a Rz

Pro znázornění jsou hodnoty drsností povrchu z tabulky 12 vykresleny do grafu 11.



➤ Graf 11: Grafické znázornění průměrných hodnot drsností povrchu při vrtání GP s různým druhem popílku

Nejlepší drsnost povrchu byla naměřená u GP s popílkem 30%K6 a nejhorší drsnost povrchu byla naměřená u GP s popílkem 30%OPE. Z grafu 11 vyplývá, že druh popílku v geopolymery ovlivňuje drsnost povrchu v dírách po vrtání jen málo, protože se s druhem popílku změnila střední aritmetická úchylka profilu maximálně o 0,7 μm.



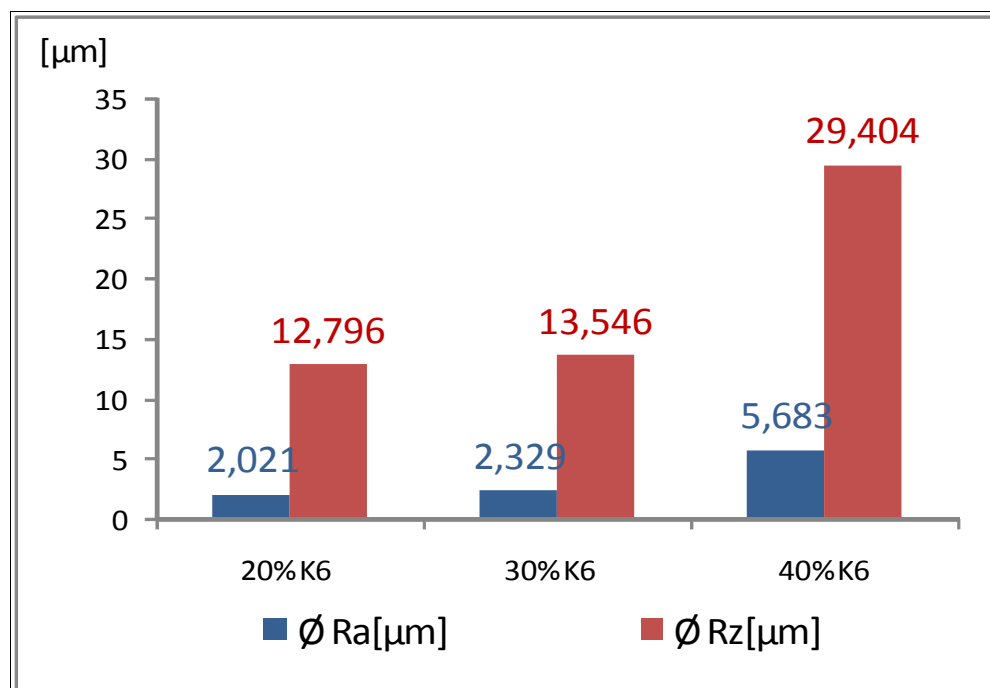
2.4.6 Vliv obsahu úletového popílku v GP na drsnost povrchu v dírách po vrtání

Hodnoty drsnosti povrchu v dírách po vrtání geopolymérů plněných různým obsahem úletového popílku K6 byly měřeny na pěti místech uvnitř prvního otvoru daného pokusu. V tabulce 13 jsou uvedené průměrné hodnoty drsností povrchu Ra (střední aritmetická úchylka profilu) a Rz (výška nerovnosti profilu) v dírách po vrtání GP s různým obsahem úletového popílku.

	Ø Ra[μm]	Ø Rz[μm]
20% K6	2,021	12,796
30% K6	2,329	13,546
40% K6	5,683	29,404

Tabulka 13: Průměrné hodnoty drsnosti povrchu Ra a Rz v dírách GP s různým obsahem popílku K6

Pro znázornění jsou hodnoty drsností povrchu z tabulky 13 vykresleny do grafu 12.



➤ Graf 12: Grafické znázornění průměrných hodnot drsností povrchu při vrtání GP s různým obsahem popílku



Nejlepší drsnost povrchu byla naměřená u GP s obsahem popílku 20%K6 a nejhorší drsnost povrchu byla naměřená u GP s obsahem popílku 40%K6. GP se 40% popílku K6 má o 64,5% horší drsnost povrchu v dírách než GP s 20% popílku K6. GP se 30 % popílku K6 má o 14% horší drsnost povrchu v dírách než GP s 20% popílku K6. Z měření vyplývá, že se zvyšujícím se obsahem popílku K6 v GP roste i drsnost povrchu.



3 Shrnutí výsledků

3.1 Hodnocení trvanlivosti nástroje

V první části experimentu byla hodnocena trvanlivost nástroje za konstantních řezných podmínek (viz. Metodika v kapitole 2.3) v závislosti na různém druhu plniva (úletové popílky) o obsahu 30%. Z tohoto hlediska byla naměřená nejdelší trvanlivost nástroje $T = 16$ min při vrtání GP s popílkem K1. Při vrtání GP s plnivem popílek K3 byla naměřená trvanlivost nástroje $T = 15$ min. Při vrtání GP s plnivem popílek OPE byla naměřená trvanlivost nástroje $T = 12$ min. Při vrtání GP s plnivem popílek PRT i K6 byla naměřená trvanlivost nástroje $T = 10,5$ min. Tyto výsledky jsou zobrazené v grafu 2, kde jsou uvedené průměrné hodnoty ze čtyř měření.

Nejdelší trvanlivost nástroje při vrtání GP s popílkem K1 je o 34,4% delší než trvanlivost nástroje při vrtání GP plněného popílkem PRT i K6. A proto je z hlediska minimalizace nákladů obrábění nejvhodnější používat GP s popílkem K1.

Ve druhé části experimentu byla hodnocena trvanlivost nástroje za konstantních řezných podmínek (viz. Metodika v kapitole 2.3) v závislosti na různém obsahu plniva (úletový popílek K6). Z tohoto hlediska byla naměřena nejdelší trvanlivost nástroje $T = 21,4$ min při vrtání GP s obsahem popílku K6 40%. Při vrtání GP s obsahem popílku K6 30% byla naměřena trvanlivost nástroje $T = 10,5$ min. Při vrtání GP s obsahem popílku K6 20% byla naměřena trvanlivost nástroje $T = 8,3$ min. Tyto výsledky jsou zobrazené v grafu 4, kde jsou uvedené průměrné hodnoty ze čtyř měření.

Z druhé části experimentu vyplývá, že čím větší byl obsah plniva popílku K6 v GP, tím větší byla i trvanlivost nástroje při vrtání. Při vrtání geopolymeru s obsahem popílku K6 40% byla naměřena trvanlivost 21,4 minuty, což je o 61,2% delší trvanlivost než při vrtání GP s 20% popílku K6.

3.2 Hodnocení sil a krouticích momentů

•V první části experimentu byly hodnoceny řezné síly, posuvové síly a krouticí momenty při konstantních řezných podmínkách (viz. Metodika v kapitole 2.3) v závislosti na různém druhu plniva (úletové popílky) o obsahu 30%.



Při porovnání průměrných hodnot posuvových sil F_f u těchto vzorků GP, vykazoval největší posuvovou sílu při vrtání vzorek GP s plnivem popílek K6 a nejmenší posuvovou sílu při vrtání vykazoval vzorek GP s plnivem popílek K1. Rozdíl mezi největší a nejmenší naměřenou řeznou silou je 20,5%. Druhá nejmenší posuvová síla byla naměřena u vzorku GP plněného popílkiem K3 a to o 14,5% menší než u vzorku GP s plnivem popílek K6. Při vrtání ostatních druhů popílku (PRT, K3 a K6) v GP nebyl zjištěn větší rozdíl než 5% oproti nejvyšší naměřené posuvové síle při vrtání GP s popílkiem 30% K1. Tyto hodnoty jsou zobrazené v grafu 5, kde jsou uvedené průměrné hodnoty z pěti měření.

Při porovnání průměrných hodnot řezných sil F_c u těchto vzorků GP, vykazoval největší řeznou sílu při vrtání vzorek GP s plnivem popílek K1 a nejmenší řeznou sílu při vrtání vykazoval vzorek GP s plnivem popílek OPE. Rozdíl mezi největší a nejmenší naměřenou řeznou silou je 17,5%. Při vrtání ostatních druhů popílku (PRT, K3 a K6) v GP byl rozdíl oproti nejvyšší naměřené řezné síle při vrtání GP s popílkiem K1 v rozmezí 9 až 10 %. Tyto výsledky jsou zobrazené v grafu 6, kde jsou uvedené průměrné hodnoty z pěti měření.

Při porovnání průměrných hodnot krouticích momentů M_k u těchto vzorků GP, vykazoval největší krouticí moment při vrtání vzorek GP s plnivem popílek K1 a nejmenší krouticí moment vykazoval při vrtání vzorek GP s plnivem popílek OPE. Rozdíl mezi největším a nejmenším naměřeným krouticím momentem je 17,5%. U ostatních druhů popílku v GP byl rozdíl krouticího momentu 10% oproti nejvyššímu naměřenému krouticímu momentu při vrtání GP s popílkiem K1. Tyto hodnoty jsou zobrazené v grafu 7, kde jsou uvedené průměrné hodnoty z pěti měření.

Z měření vyplývá že, druh popílku v GP nemá příliš velký vliv na velikost řezných sil. Z hlediska druhu plniva byla naměřena nejnižší řezná síla a krouticí moment u GP s popílkiem OPE.

•Ve druhé části experimentu byly hodnoceny řezné síly, posuvové síly a krouticí momenty při konstantních řezných podmínkách (viz. Metodika v kapitole 2.3) v závislosti na různém obsahu plniva (úletový popílek K6).

Při porovnání průměrných hodnot posuvových sil F_f u těchto vzorků GP, vykazoval největší posuvovou sílu při vrtání vzorek GP s obsahem plniva 20% K6 a nejmenší posuvovou sílu vykazoval při vrtání vzorek GP s plnivem 40% K1. Rozdíl



mezi největší a nejmenší naměřenou řeznou silou je 78%. U vzorku GP plněného z 30% popílkem K6 byla změřená posuvová síla o 33,5% menší než u vzorku GP 20%K6. Tyto výsledky jsou zobrazené v grafu 8, kde jsou uvedené průměrné hodnoty z pěti měření.

Při porovnání průměrných hodnot řezných sil F_c u těchto vzorků GP vykazoval největší řeznou sílu při vrtání vzorek GP s obsahem plniva 30% K6 a nejmenší řeznou sílu při vrtání vykazoval vzorek GP s plnivem 40% K6. Rozdíl mezi naměřenou největší a nejmenší řeznou silou je 17%. U GP s 20% obsahem popílku K6 byl rozdíl oproti nejvyšší naměřené řezné síle při vrtání GP 30% K6 menší o 16,3%. Tyto výsledky jsou zobrazené v grafu 9, kde jsou uvedené průměrné hodnoty z pěti měření.

Při porovnání průměrných hodnot krouticích momentů M_k u těchto vzorků GP vykazoval největší krouticí moment při vrtání vzorek GP s obsahem plniva 30% K6 a nejmenší krouticí moment při vrtání vykazovaly vzorky GP s plnivem 20% a 40% K6. Rozdíl mezi největším a nejmenším naměřeným krouticím momentem je 16,6%. Tyto výsledky jsou zobrazeny v grafu 10, kde jsou uvedeny průměrné hodnoty z pěti měření.

3.3 Hodnocení parametrů drsnosti povrchu

•V první části experimentu byly hodnoceny parametry drsnosti povrchu při konstantních řezných podmínkách (viz. Metodika v kapitole 2.3) v závislosti na různém druhu plniva (úletové popílký) o obsahu 30%. Hodnoty drsností povrchu R_a (střední aritmetická úchylka profilu) a R_z (výška nerovnosti profilu) byly měřeny na pěti místech prvního otvoru vyvrtaného nově přebroušeným vrtákem.

Nejlepší drsnost povrchu byla naměřena u GP s popílkem 30% K6 a nejhorší drsnost povrchu byla naměřena u GP s popílkem 30% OPE. Z grafu 11 vyplývá, že druh popílku v geopolymeru ovlivňuje drsnost povrchu jen málo, protože se s druhem popílku změnila střední aritmetická úchylka profilu maximálně o 0,7 μm . Tyto výsledky jsou zobrazené v grafu 11, kde jsou uvedené průměrné hodnoty z pěti měření. Fotky vzorků GP po vrtání jsou uvedené v příloze 4.

•Ve druhé části experimentu byly hodnoceny parametry drsnosti povrchu při konstantních řezných podmínkách (viz. Metodika v kapitole 2.3) v závislosti na různém obsahu plniva (úletový popílek K6). Hodnoty drsností povrchu R_a (střední



aritmetická úchylka profilu) a Rz (výška nerovnosti profilu) byly měřeny na pěti místech prvního otvoru vyvrtaného nově přebroušeným vrtákem.

Nejlepší drsnost povrchu byla naměřena u GP s obsahem popílku 20% K6 a nejhorší drsnost povrchu byla naměřena u GP s obsahem popílku 40% K6. Z měření vyplývá, že se zvyšujícím se obsahem popílku K6 v GP, roste i drsnost povrchu. GP se 40% popílku K6 má o 64,5% horší drsnost povrchu v dírách než GP s 20% popílku K6. GP s 30 % popílku K6 má o 14% horší drsnost povrchu v dírách než GP s 20% popílku K6. Tyto výsledky jsou zobrazené v grafu 12, kde jsou uvedené průměrné hodnoty z pěti měření. Fotky vzorků GP po vrtání jsou uvedené v příloze 4.



4 Závěr

V dnešní době nacházejí geopolymery své uplatnění ve spoustě rozličných průmyslových oblastech jako je stavebnictví, automobilový průmysl, kosmonautika, výroba letadel, lodí atd.. Geopolymery mohou velice úspěšně nahradit tradičně používané materiály v různých průmyslových oblastech díky svým specifickým vlastnostem. V budoucnosti lze předpokládat stále častější využití geopolimerů, a proto je další výzkum a vývoj těchto materiálů i nadále velice důležitý.

Cílem této bakalářské práce bylo zjistit vliv druhu a obsahu úletového popílku v geopolymery na trvanlivost nástroje, řezné síly a parametry drsnosti povrchu při vrtání.

Byla navržena metodika měření (viz. kapitola 2.3), kterou byly zjištěny časy opotřebení hřbetu břitu nástroje a síly při vrtání vzorků geopolimerů. A po té byly měřeny parametry drsnosti povrchu v dírách.

Celý experiment byl rozdělený na dvě části a byl hodnocen ze dvou základních hledisek. Prvním z nich byl vliv druhu plniva (úletového popílku) v geopolymery na trvanlivost nástroje, řezné síly a drsnost povrchu při vrtání. A druhým hlediskem byl vliv obsahu plniva popílku K6 v geopolymery na trvanlivost nástroje, řezné síly a drsnost povrchu při vrtání. Tyto technologické zkoušky byly posuzovány z hlediska trvanlivosti nástroje, řezné síly, posuvové síly, krouticího momentu a parametrů drsnosti povrchu Ra a Rz.

- Poznatky z vrtání geopolimerů plněných různým druhem úletového popílku.

Z grafu 2 vyplývá, že nejdelší trvanlivost nástroje byla při vrtání GP plněného z 30% popílkem K1, a to je o 34,4% delší trvanlivost než při vrtání GP plněného z 30% popílkem K6 i PRT. Z hlediska minimalizace nákladů obrábění doporučuji používat geopolimer plněný popílkem K1, vzhledem k výrazně delší trvanlivosti nástroje při jeho vrtání.

Z měření sil a krouticích momentů vyplývá, že druh popílku v GP nemá příliš velký vliv na velikost řezných sil.

Z měření drsnosti povrchu vyplývá, že druh popílku v geopolymery ovlivňuje drsnost povrchu jen málo, protože se s druhem popílku změnila střední aritmetická úchylka profilu maximálně o 0,7 μm (viz. Graf 11).



- Poznatky z vrtání geopolymerů plněných různým obsahem úletového popílku K6.

Z grafu 4 vyplývá, že čím byl větší obsah plniva popílku K6 v geopolymeru, tím větší byla i trvanlivost nástroje při vrtání. Při vrtání geopolymeru s obsahem popílku K6 40% byla naměřena trvanlivost nástroje $T = 21,4$ minuty, což je o 61,2% delší trvanlivost nástroje než při vrtání GP s 20% popílku K6.

Nejmenší řezná síla a krouticí moment byly naměřeny při vrtání GP se 40% popílku K6.

Z měření drsnosti vyplývá, že se zvyšujícím se obsahem popílku K6 v GP roste i drsnost povrchu. Nejlepší drsnost povrchu byla naměřená u GP s obsahem popílku 20%K6 a nejhorší drsnost povrchu byla naměřená u GP s obsahem popílku 40%K6. GP se 40% popílku K6 má o 64,5% horší drsnost povrchu v dírách než GP s 20% popílku K6. GP s 30 % popílku K6 má o 14% horší drsnost povrchu v dírách než GP s 20% popílku K6.

Z hlediska minimalizace nákladů obrábění doporučuji používat geopolymer plněný ze 40% popílkem K6, vzhledem k výrazně delší trvanlivosti nástroje při jeho vrtání. Ale vzhledem k jeho výrazně horší drsnosti povrchu v dírách po vrtání, také doporučuji důkladně zvážit a porovnat všechny okolnosti výroby i následného použití výrobku.

Ze všech výše uvedených experimentů vyplývá, že pro efektivní řízení výroby je nejvhodnější používat GP s 30% obsahem popílku K1. Při tomto složení je optimální trvanlivost nástroje i drsnost povrchu.



Seznam literatury

- [1] *Geopolymery budoucnost mostního stavitelství?* [online] 14.10.2010 [cit. 3.února 2012] Dostupné na: <http://www.silnice-zeleznice.cz/clanek/geopolymery-budoucnost-mostniho-stavitelstvi/>
- [2] *Geopolymery.* [online] 26.4.2010 [cit. 3.února 2012] Dostupné na: http://www.matrix-2012.cz/index.php?option=com_content&view=article&id=1149:geopolymery&catid=64:rzne&Itemid=88
- [3] *Geopolymery a jejich použití pro nakládání s odpady.* [online] 19.4.2006 [cit. 3.února 2012] Dostupné na: http://odpady.ihned.cz/c4-10066110-18251200-E00000_d-a-jejich-pouziti-pro-nakladani-s-odpady_
- [4] *Češi vyvinuli revoluční stavební materiál.* [online] 29.3.2007 [cit. 3.února 2012] Dostupné na: http://www.tyden.cz/rubriky/veda-a-technika/veda/cesivyvinuli-revolucni-stavebni-material_7194.html
- [5] *Concrete based on Fly ash Geopolymer.* [online] 2006 [cit. 21.února 2012] Dostupné na: http://www.geopolymery.eu/aitom/upload/documents/publikace/2006/iba_usil_2006_text_verzebook.pdf
- [6] *Alkalicky aktivované materiály, geopolymery.* [online] 2007 [cit. 25.února 2012] Dostupné na: http://www.vscht.cz/sil/pojiva/geo_2007.pdf
- [7] *Geopolymerní betony – materiály šetrné k životnímu prostředí.* [online] 2008 [cit. 21.února 2012] Dostupné na: http://www.fce.vutbr.cz/veda/juniorstav2008_sekce/pdf/4_2/Kynclova_Magdalena_CL.pdf
- [8] *Aktivisté kritizují, že popílek svážejí do Havířova.* [online] 3.2.2012 [cit. 22.února 2012] Dostupné na: http://mm.denik.cz/73/8d/20120203_ha_popilek3_denik_clanek_solo.jpg
- [9] VIGNER, M., PŘIKRIL, Z. *Obrábění – Technický průvodce.* 1. vyd. SNTL Praha 1984. 800 s.
- [10] AB SANDVIK COROMANT – SANDVIK CZ s.r.o. *Příručka obrábění.* Přel. M. KUDELA. 1. vyd. Scientia, s.r.o., Praha 1997. 857 s. Přel. z: Modern Metal Cutting – A Practical Handbook. ISBN 91-97 22 99-4-6.



- [11] ŘASA, J., GABRIEL V. *Strojírenská technologie 3 – 1. díl Metody, stroje a nástroje pro obrábění*. 1.vyd. Pedagogické nakladatelství Scientia, s.r.o., Praha 2000. 256 s. ISBN 80-7183-207-3.
- [12] VLACH, B., aj. *Technologie obrábění a montáží*. 1. vyd. SNTL Praha 1990. 464 s.
- [13] GAZDA, J., aj. *Teorie obrábění – řezné síly při obrábění*. 1. vyd. Vysoká škola strojní a textilní v Liberci. Liberec 1993. 123 s. ISBN 80-7083-110-3.
- [14] *Strojírenství – frézování* [online] 2011 [cit. 22.března 2012] Dostupné na: <http://strojirenstvi-frezovani.blogspot.com/2011/03/131-slinute-karbidy-sk.html>
- [15] HLUCHÝ, M., HANĚK, V. *Strojírenská technologie 2 – 2. díl Koroze, základy obrábění, výrobní postupy*. 2.vyd. Pedagogické nakladatelství Scientia, s.r.o., Praha 2001. 176 s. ISBN 80-7183-245-6.
- [16] KOČMAN, K., PROKOP, J. *Technologie obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., prosinec 2001. 270 s. ISBN 80-214-1996-2.
- [17] PŘIKRIL, Z. MUSÍLKOVÁ, R., *Teorie obrábění*. 3. vyd. SNTL Praha 1982. 240 s.
- [18] NESLUŠAN, M., TUREK, S., BRYCHTA, J., aj. *Experimentálne metódy v trieskovom obrábaní*. 1. vyd. Žilina: Žilinská univerzita, 2007. 343 s. ISBN 978-80-8070-711-8.
- [19] ZETEK, M. *Vliv otěruvzdorných vrstev na řezivost nástrojů*. [online]. [cit. 2.dubna 2012]. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni. Dostupné na: http://www.benjamin.ic.cz/vp_zetek.pdf
- [20] VACULÍK, J. BCM Sensor Technologies: *Čínské senzory na evropském trhu*. [online]. [cit. 20.dubna 2012]. Praha: BHV senzory. Dostupné na: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=30389
- [21] ŠTRAJBL, J. *Obráběcí stroje* 1974. 2.vyd. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1975. 608 s. typ. č. L13-E1-III-31/22476.
- [22] ČEP, R., ORLOVSKÝ, I., aj. *Metody zkoušek obrobitelnosti materiálů*. [online]. [cit. 25.dubna 2012] VŠB – TU Ostrava, Katedra obrábění a montáže. TU Košice, Fakulta výrobních technologií. 2009 Dostupné na: http://www.infocube.cz/images/automobilindustry/clanky/TU_Kosice_Metody_zkousek_52.pdf
- [23] JERSÁK, J., aj. *Obrábění geopolymerů*. [výzkumná zpráva]. TU v Liberci, září 2010. 5 s.



Seznam obrázků

Obr. 1: Příklady struktur geopolymérů [3].....	10
Obr. 2: Terminologie Davidovits [6]	11
Obr. 3: Postup výroby geopolyméru [5].....	12
Obr. 4: Ukládání popílku do povrchového dolu v Havířově [8].....	13
Obr. 5: Příklady použití geopolymérů [1].....	14
Obr. 6: Měření opotřebení [12].....	15
Obr. 7: Parametry opotřebení břitů šroubovitého vrtáku [19].....	16
Obr. 8: Závislost výrobních nákladů na velikosti otupení břitu [9].....	16
Obr. 9: Velikost optimální trvanlivosti T_{opt} [12].....	17
Obr. 10: Hlavní mechanismy opotřebení břitu nástroje [16].....	18
Obr. 11: Vliv posuvu a řezné rychlosti na druh opotřebení [12].....	18
Obr. 12: Charakteristický průběh opotřebení VB na době řezání [16].....	19
Obr. 13: Křivky otupení břitu nástroje při proměnné řezné rychlosti [22].....	21
Obr. 14: Stanovení jednotlivé trvanlivosti na základě kritéria opotřebení [22].....	21
Obr. 15: Závislost trvanlivosti na řezné rychlosti [22].....	22
Obr. 16: Schema čelní zkoušky obrobitelnosti [22].....	23
Obr. 17: Vrtání zplna a do předvrtané díry [9].....	26
Obr. 18: Šroubovitý vrták s kuželovou stopkou [11].....	27
Obr. 19: Způsoby ostření šroubovitého vrtáku [11].....	27
Obr. 20: Princip ostření vrtáků [11].....	28
Obr. 21: Kinematika vrtacího procesu při vrtání šroubovitým vrtákem [16].....	29
Obr. 22: Rychlosti při vrtání [10].....	29
Obr. 23: Radiální hloubka řezu při vrtání zplna a na jádro [10].....	30
Obr. 24: Řezné síly při vrtání šroubovitým vrtákem [16].....	31



Obr. 25: Dráha nástroje [10].....	32
Obr. 26: Otočná vrtačka VR4.....	35
Obr. 27: Nástrojová univerzální bruska N1.....	36
Obr. 28: Odporový dynamometr.....	36
Obr. 29: Schéma dynamometru.....	37
Obr. 30: Souprava pro měření sil a krouticích momentů.....	38
Obr. 31: Kalibrace dynamometru.....	38
Obr. 32: Nástrojová lupa Brinell.....	39
Obr. 33: Mikroskop Arsenal SZP 3112-T s kamerou LABO 3MP a počítač.....	39
Obr. 34: Laboratorní profiloměr MITUTOYO SV – 2000 N2.....	40
Obr. 35: Opotřebení hřbetu vrtáku po vrtání GP s obsahem popílku K6 30%.....	47
Obr. 36: Opotřebení hřbetu vrtáku po vrtání GP s obsahem popílku PRT 30%.....	47
Obr. 37: Opotřebení hřbetu vrtáku po vrtání GP s obsahem popílku OPE 30%.....	47
Obr. 38: Opotřebení hřbetu vrtáku po vrtání GP s obsahem popílku K1 30%.....	48
Obr. 39: Opotřebení hřbetu vrtáku po vrtání GP s obsahem popílku K3 30%.....	48
Obr. 40: Opotřebení hřbetu vrtáku po vrtání GP s obsahem popílku K6 20%.....	51
Obr. 41: Opotřebení hřbetu vrtáku po vrtání GP s obsahem popílku K6 30%.....	51
Obr. 42: Opotřebení hřbetu vrtáku po vrtání GP s obsahem popílku K6 40%.....	52



Seznam tabulek

<i>Tabulka 1: Metodika experimentu při obrábění vrtáním.....</i>	<i>43</i>
<i>Tabulka 2: Tabulkové zpracování hodnot opotřebení nástroje při vrtání GP_30%K3</i>	<i>44</i>
<i>Tabulka 3: Tabulka trvanlivostí nástroje při vrtání GP s různými druhy popílku.....</i>	<i>45</i>
<i>Tabulka 4: Tabulkové zpracování hodnot opotřebení nástroje při vrtání GP_20%K6</i>	<i>49</i>
<i>Tabulka 5: Tabulka trvanlivostí nástroje při vrtání GP s různým obsahem popílku K6</i>	<i>50</i>
<i>Tabulka 6: Zpracování hodnot posuvové síly F_f při vrtání GP s různým druhem popílku.....</i>	<i>52</i>
<i>Tabulka 7: Zpracování hodnot řezné síly F_c při vrtání GP s různým druhem popílku</i>	<i>54</i>
<i>Tabulka 8: Zpracování hodnot krouticího momentu M_k při vrtání GP s různým druhem popílku.....</i>	<i>55</i>
<i>Tabulka 9: Zpracování hodnot posuvové síly F_f při vrtání GP s různým obsahem popílku.....</i>	<i>56</i>
<i>Tabulka 10: Zpracování hodnot řezné síly F_c při vrtání GP s různým obsahem popílku.....</i>	<i>57</i>
<i>Tabulka 11: Zpracování hodnot krouticího momentu M_k při vrtání GP s různým obsahem popílku.....</i>	<i>58</i>
<i>Tabulka 12: Průměrné hodnoty drsnosti povrchu R_a a R_z.....</i>	<i>60</i>
<i>Tabulka 13: Průměrné hodnoty drsnosti povrchu R_a a R_z v dírách GP s různým obsahem popílku K6.....</i>	<i>61</i>



Seznam grafů

- Graf 1: Grafické zpracování hodnot opotřebení nástroje při vrtání GP_30%K3....44
- Graf 2: Vliv druhu popílku v geopolymery na trvanlivost nástroje při vrtání.....45
- Graf 3: Grafické zpracování hodnot opotřebení nástroje při vrtání GP_20%K6....48
- Graf 4: Vliv obsahu popílku K6 v geopolymery na trvanlivost nástroje při vrtání. 49
- Graf 5: Grafické znázornění průměrných hodnot posuvové síly F_f při vrtání GP s různým druhem popílku.....52
- Graf 6: Grafické znázornění průměrných hodnot řezné síly F_c při vrtání GP s různým druhem popílku.....53
- Graf 7: Grafické znázornění průměrných hodnot krouticích momentů M_k při vrtání GP s různým druhem popílku.....54
- Graf 8: Grafické znázornění průměrných hodnot posuvové síly F_f při vrtání GP s různým obsahem popílku.....56
- Graf 9: Grafické znázornění průměrných hodnot řezné síly F_c při vrtání GP s různým obsahem popílku.....57
- Graf 10: Grafické znázornění průměrných hodnot krouticích momentů M_k při vrtání GP s různým obsahem popílku.....58
- Graf 11: Grafické znázornění průměrných hodnot drsností povrchu při vrtání GP s různým druhem popílku.....59
- Graf 12: Grafické znázornění průměrných hodnot drsností povrchu při vrtání GP s různým obsahem popílku.....60